



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Diseño y Construcción de un Sistema de Medidas de Efecto Hall DC y AC

Design and Construction of a Measurement System of Hall Effect DC and AC

Ing. Jhon Jaither Melo Quintero

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Física y Química
Manizales, Colombia

2011

Diseño y Construcción de un Sistema de Medidas de Efecto Hall DC y AC

Ing. Jhon Jaither Melo Quintero

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ciencias-Física

Director:
Ph.D. Andrés Rosales Rivera

Línea de Investigación:
Magnetismo y Materiales Avanzados

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Física y Química
Manizales, Colombia
2011

A mi Madre María Amparo Q.

La imaginación es más importante que el conocimiento. El conocimiento es limitado, la imaginación rodea al mundo.

Albert Einstein

Agradecimientos

Quiero dar gracias a Dios por permitirme llegar a la culminación de mi carrera; y expresar unos sinceros agradecimientos a mis padres y a mis hermanos por su acompañamiento y apoyo en todo momento, especialmente a mi madre por brindarme su ayuda, amor, paciencia y motivación. Agradezco también a mis amigos por darme ánimo y apoyo necesario para superar aquellos momentos difíciles.

Agradezco a la Dirección de Investigaciones de Manizales DIMA de la Universidad Nacional de Colombia por su apoyo con el proyecto “Estudio de las Propiedades Físicas y Estructurales de Aleaciones Magnéticas Blandas” llevado a cabo entre agosto de 2007 y noviembre de 2008, ya que gracias a este proyecto pude costear una parte considerable de mis estudios y desarrollar una gran parte de mi trabajo de tesis.

Finalmente quiero agradecer al doctor Andrés Rosales Rivera, director del Grupo de Magnetismo y Materiales Avanzados de Manizales, por brindarme su colaboración, paciencia y apoyo. También a mis amigos y compañeros de laboratorio, Luis Vidal, Nicolás Salazar, Diego Coral, Oscar Moscoso, Mónica Bernal, Juan J. Valencia, Helver Giraldo, Juan F. Jaramillo, Diego Gómez, Santiago Calvo, Roberto Bernal, Luis F. Mulcue, entre otros, en especial a Abilo Velásquez por su ayuda y aporte de conocimientos relacionados con la parte práctica y teórica de mi trabajo, a todos ellos muchas gracias.

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño y la construcción de un sistema de medida de efecto Hall (SMEH) basado en un Sistema Delta Mode (Instrumentos Keithley 6221-2182A). Las técnicas de medición SMEH incluyen voltaje Hall, resistividad, curvas voltaje-corriente, concentración de portadores, movilidad y el método de Van Der Pauw. El SMEH opera tanto en modo de corriente continua como en alterna (0.001–1 Hz). Un software altamente integrado con el ambiente de LabView fue desarrollado para la operación del sistema y la adquisición de datos. El software permite al usuario graficar el voltaje Hall, la densidad y la movilidad de portadores en función de la corriente, del campo magnético y la frecuencia. Un imán permanente Phylatex es utilizado para generar campos magnéticos (H) de hasta 800 mT. El SMEH se puso a prueba utilizando una muestra de cobre (Cu) y se utilizó para estudiar las propiedades de transporte eléctrico a temperatura ambiente de cintas magnéticas blandas de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ y $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$, y de $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$.

Palabras clave: Efecto Hall, Densidad de Portadores, Resistividad.

Abstract

The design and building of a Hall Effect measurement (HEMS) system based in a Delta Mode System (Keithley Instruments 6221–2182A) is presented. The HEMS measurement techniques include Hall voltage, resistivity, I-V curves, carrier concentration, mobility and the Van Der Pauw method. The HEMS was operated in both dc and ac (0.001–1 Hz) current modes. Highly integrated software using LabView environment was developed for system operation and data acquisition. The software enables the user to graphic Hall voltage, density and mobility of carriers in function of current, magnetic field and frequency. A permanent magnet Phylatex was employed to generate magnetic fields (H) up to 800 mT. The HEMS was tested using a standard sample of Cu and was used to study the room temperature transport properties of the soft magnetic ribbons of $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ and $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$, and of $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ for $x = 0, 1.5, 2, 3$.

Keywords: Hall Effect, Charge Carrier Density, Resistivity.

Contenido

Resumen	IX
Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XXII
Introducción	1
1. Teoría del efecto Hall, técnicas de medida y aplicaciones	3
1.1 El efecto Hall	4
1.1.1 Teoría del Efecto Hall, Movilidad y Conductividad	4
1.1.2 El Coeficiente Hall y los Portadores de Carga	8
1.1.3 Portadores de Carga en Metales	10
1.1.4 El Efecto Hall AC	14
1.2 Técnicas de medida del efecto Hall	15
1.2.1 La Técnica de Cuatro Puntas.....	15
1.2.2 La Técnica de Van Der Pauw.....	23
1.2.2.1 Geometría de la Muestra de Material.....	26
1.2.2.2 Medidas y Cálculos de Resistividad.....	27
1.2.2.3 Medidas y Cálculos de Efecto Hall	30
1.2.3 La Técnica AC	33
1.3 Fuentes de error en medidas Hall	34
1.3.1 Contactos para corriente y medición.....	34
1.3.2 Homogeneidad del campo magnético	34
1.3.3 Efectos termomagnéticos	35
1.3.4 Efectos fotoeléctricos	35
1.3.5 Dimensiones de la muestra.....	35
1.3.6 Mediciones eléctricas y térmicas.....	35
1.4 Tipos de contactos sobre la muestra	36
1.4.1 Soldadura por fusión	36

1.4.1.1 Soldadura TIG	36
1.4.1.2 Soldadura MIG	37
1.4.1.3 Soldadura por puntos	37
1.4.2 Soldadura eléctrica	38
1.4.3 Contacto por Pintura conductora	38
1.4.4 Contacto por presión	38
1.5 Aplicaciones del efecto Hall	39
1.5.1 Sensores de Efecto Hall	39
1.5.1.1 Medición de campo magnético	39
1.5.1.2 Sensores de corriente	40
1.5.1.3 Sensores de posición	41
1.5.1.4 Sensores de aceleración	42
2. Sistema de Medidas de Efecto Hall DC y AC	45
2.1 Clasificación de los sistemas de efecto Hall	45
2.2 Desarrollo experimental	47
2.2.1 Diseño y características del sistema	47
2.2.2 Hardware del sistema	47
2.2.3 Software de control	50
2.2.4 Diseño y características del portamuestra	51
3. Resultados y discusión	57
3.1 Caracterización eléctrica de Circuitos de Resistencias	58
3.1.1 Medidas sobre el Circuito de Baja Resistencia	60
3.1.2 Medidas sobre el Circuito de Alta Resistencia	61
3.2 Caracterización eléctrica de Muestras de Cobre	62
3.2.1 Medidas sobre la Primera Muestra de Cobre	63
3.2.2 Medidas sobre segunda Muestra de Cobre	70
3.3 Medidas de magnetotransporte en Cintas Magnéticas basadas en Cobalto	74
3.3.1 Caracterización eléctrica de la Cinta de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$	75
3.3.2 Caracterización eléctrica de la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$	83
3.3.2.1 Medidas sobre $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ mediante la Técnica Hall de Cuatro Puntas	83
3.3.2.2 Medidas sobre $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ mediante la Técnica Hall de Van Der Pauw	90

3.3.2.3 Medidas sobre $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ mediante la Técnica Hall AC	94
3.4 Medidas de magnetotransporte y magnéticas en Cintas tipo Finemet.....	99
3.4.1 Caracterización eléctrica de $\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ por medio de las Técnicas Hall DC	99
3.4.2 Caracterización eléctrica de $\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ por medio de la Técnica Hall AC	116
3.4.3 Caracterización magnética de $\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ por medio de las Técnicas de Magnetización DC y Susceptibilidad AC	127
4. Conclusiones.....	133
5. Perspectivas.....	137
6. Bibliografía.....	141
A. Anexo: Manual del Usuario del Sistema de Medidas de Efecto Hall DC Y AC	147
B. Anexo: Artículos y trabajos relacionados con este trabajo.....	159

Lista de figuras

Figura 1.1. Voltaje Hall (V_H) medido sobre una lámina de material conductor, B campo magnético aplicado, I corriente, d espesor de la lámina.	4
Figura 1.2. Conductividad en función del inverso de la temperatura para semiconductores.	7
Figura 1.3. Configuración utilizada en la Técnica de Cuatro Puntas para la medida del voltaje Hall.	16
Figura 1.4. Voltaje Hall vs Corriente para un campo constante de 250 mT del cobre.	17
Figura 1.5. Voltaje Hall vs Corriente para un campo constante de 250 mT del zinc.	17
Figura 1.6. Voltaje Hall vs Corriente para un campo constante de 250 mT y una temperatura de 300 K del germanio tipo p.	18
Figura 1.7. Voltaje Hall vs Campo para una corriente constante de 12 A del cobre.	19
Figura 1.8. Voltaje Hall vs Campo para una corriente constante de 12 A del zinc.	19
Figura 1.9. Voltaje Hall vs Campo para una corriente constante de 30 mA y una temperatura de 300 K del germanio tipo p.	19
Figura 1.10. Logaritmo de la conductividad del germanio como función del inverso de la temperatura.	22
Figura 1.11. Resistividad Hall en función del campo magnético para materiales ferromagnéticos.	23
Figura 1.12. Configuración en la Técnica de Van Der Pauw para medidas de resistividad en materiales.	24
Figura 1.13. Configuración en la Técnica de Van Der Pauw para medidas de efecto Hall en materiales.	25
Figura 1.14. Geometrías de la muestra para medidas de resistividad y efecto Hall en la Técnica de Van Der Pauw.	27
Figura 1.15. Configuración en Van Der Pauw usada en la determinación de las dos resistencias características R_A y R_B	28

Figura 1.16. Esquema de las soldaduras por fusión:(a) TIG, y (b) MIG.....	37
Figura 1.17. Sensor Hall para medir campo magnético: (a) Sonda Hall, (b) Configuración de una Sonda Hall.....	40
Figura 1.18. Esquemas de sensores Hall para medición de corriente: (a) Sensor de anillo cerrado, (b) Sensor de anillo abierto.....	41
Figura 1.19. Sensor de aceleración de efecto Hall, 1) sensor de efecto Hall, 2) iman permanente, 3) resorte, 4) placa de amortiguación.....	42
Figura 2.1. Diagrama de Flujo para realizar medidas de Voltaje Hall contra Corriente con Campo (B) y Temperatura (T) constantes.	46
Figura 2.2. Imagen del Sistema de Efecto Hall DC y AC.....	48
Figura 2.3. Diagrama de bloques del Sistema de Efecto Hall DC y AC.....	48
Figura 2.4. Esquema del Circuito Inversor de Campo Magnético.	49
Figura 2.5. Datos en Formato de Texto entregados por la técnica Hall de Van Der Pauw variando el campo y para una corriente constante.....	52
Figura 2.6. Portamuestras para un material magnético de 2x0.5 cm: (a) Muestra contactada en la mitad de sus lados, (b) Muestra contactada en las esquinas.	53
Figura 2.7. Portamuestra para un material semiconductor de hasta 2x2 cm.	53
Figura 2.8. Portamuestra introducido dentro de una caja negra para la realización de medidas en la oscuridad.....	54
Figura 3.1. Circuito de Resistencias en Configuración tipo Puente.....	58
Figura 3.2. Diagrama de los circuitos simuladores de muestras: (a) Imagen de los Circuitos, (b) Circuito de Baja Resistencia, (c) Circuito de Alta Resistencia.	59
Figura 3.3. Imagen de los Portamuestras de Cobre: (a) Primera Muestra de Cobre, (b) Segunda Muestra de Cobre.....	63
Figura 3.4. Voltaje Hall en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Primera Muestra de Cobre: (a) Voltaje Hall vs Corriente para varios campos constantes (b) Voltaje Hall vs Campo para varias corrientes constantes.	64
Figura 3.5. Densidad de Portadores en función de la Corriente para la Primera Muestra de Cobre.	65
Figura 3.6. Densidad de Portadores en función del Campo Magnético para la Primera Muestra de Cobre.	66

Figura 3.7. Gráficos de los Resultados de Densidad de Portadores y de Coeficiente Hall para la Primera Muestra de Cobre.	68
Figura 3.8. Gráficos de los Resultados de Movilidad, de Tiempo Libre Medio, y de Recorrido Libre Medio para la Primera Muestra de Cobre.	70
Figura 3.9. Densidad de Portadores en función de la Corriente para la Segunda Muestra de Cobre.	71
Figura 3.10. Densidad de Portadores en función del Campo Magnético para la Segunda Muestra de Cobre.	72
Figura 3.11. Movilidad en función de la Corriente para segunda Muestra de Cobre.	73
Figura 3.12. Movilidad en función del Campo Magnético para segunda Muestra de Cobre.	73
Figura 3.13. Voltaje Hall en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$: (a) Voltaje Hall vs Corriente para varios campos constantes, (b) Voltaje Hall vs Campo para varias corrientes constantes.	76
Figura 3.14. Densidad de Portadores en función de la Corriente para la Cinta de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$	76
Figura 3.15. Densidad de Portadores en función del Campo Magnético para la Cinta de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$	77
Figura 3.16. Gráficos de los Resultados de Densidad de Portadores y de Coeficiente Hall para la Cinta de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$	79
Figura 3.17. Gráficos de los Resultados de Movilidad, de Tiempo Libre Medio, y de Recorrido Libre Medio para la Cinta de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$	82
Figura 3.18. Voltaje Hall en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$: (a) Voltaje Hall vs Corriente para varios campos constantes, (b) Voltaje Hall vs Campo para varias corrientes constantes.	84
Figura 3.19. Densidad de Portadores en función de la Corriente para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ (Técnica de Cuatro Puntas).	84
Figura 3.20. Densidad de Portadores en función del Campo Magnético para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ (Técnica de Cuatro Puntas).	85
Figura 3.21. Gráficos de los Resultados de Densidad de Portadores y de Coeficiente Hall para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$	87

Figura 3.22. Gráficos de los Resultados de Movilidad, de Tiempo Libre Medio, y de Recorrido Libre Medio para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$	89
Figura 3.23. Densidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético para las Cintas de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ y $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$: (a) Densidad vs Corriente para un campo de 120 mT, (b) Densidad vs Campo para una corriente 10 mA.	90
Figura 3.24. Densidad de Portadores en función de la Corriente para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ (Técnica de Van Der Pauw).	92
Figura 3.25. Densidad de Portadores en función del Campo Magnético para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ (Técnica de Van Der Pauw).	92
Figura 3.26. Movilidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$: (a) Movilidad vs Corriente para 120 mT, (b) Movilidad vs Campo para 10 mA.	93
Figura 3.27. Amplitud y Fase del Voltaje Hall AC en función del Campo Magnético para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$: (a) Amplitud vs Campo para varias frecuencias constantes, (b) Fase vs Campo para varias frecuencias constantes.	95
Figura 3.28. Amplitud y Fase del Voltaje Hall AC en función de la Frecuencia para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$: (a) Amplitud vs Frecuencia para varios campos constantes, (b) Fase vs Frecuencia para varios campos constantes.	96
Figura 3.29. Densidad de Portadores en función del Campo Magnético y de la Frecuencia para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$: (a) Densidad vs Campo para varias frecuencias constantes, (b) Densidad vs Frecuencia para varios campos constantes.	97
Figura 3.30. Voltaje Hall en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet Nb_3Mo_0 : (a) Voltaje Hall vs Corriente para varios campos constantes, (b) Voltaje Hall vs Campo para varias corrientes constantes.	100
Figura 3.31. Voltaje Hall en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet Nb_1Mo_2 : (a) Voltaje Hall vs Corriente para varios campos constantes, (b) Voltaje Hall vs Campo para varias corrientes constantes.	100
Figura 3.32. Voltaje Hall en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet Nb_0Mo_3 : (a) Voltaje Hall vs Corriente para varios campos constantes, (b) Voltaje Hall vs Campo para varias corrientes constantes.	101

Figura 3.33. Voltaje Hall en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet Nb _{1.5} Mo _{1.5} : (a) Voltaje Hall vs Corriente para varios campos constantes, (b) Voltaje Hall vs Campo para varias corrientes constantes.	101
Figura 3.34. Densidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet Nb ₃ Mo ₀ : (a) Densidad vs Corriente para varios campos constantes, (b) Densidad vs Campo para varias corrientes constantes.	102
Figura 3.35. Densidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet Nb ₁ Mo ₂ : (a) Densidad vs Corriente para varios campos constantes, (b) Densidad vs Campo para varias corrientes constantes.	103
Figura 3.36. Densidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet Nb ₀ Mo ₃ : (a) Densidad vs Corriente para varios campos constantes, (b) Densidad vs Campo para varias corrientes constantes.	103
Figura 3.37. Densidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet Nb _{1.5} Mo _{1.5} : (a) Densidad vs Corriente para varios campos constantes, (b) Densidad vs Campo para varias corrientes constantes.	104
Figura 3.38. Densidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético de las Cintas Fe _{73.5} Si _{13.5} B ₉ Nb _{3-x} Mo _x Cu ₁ para x = 0, 1.5, 2, 3: (a) Densidad vs Corriente para un campo de 800 mT, (b) Densidad vs Campo para una corriente 20 mA.	105
Figura 3.39. Gráficos de los Resultados de Densidad de Portadores y de Coeficiente Hall para las Cintas de Fe _{73.5} Si _{13.5} B ₉ Nb _{3-x} Mo _x Cu ₁ para x = 0, 1.5, 2, 3.....	108
Figura 3.40. Movilidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet Nb ₃ Mo ₀ : (a) Movilidad vs Corriente para varios campos constantes, (b) Movilidad vs Campo para varias corrientes constantes.....	109
Figura 3.41. Movilidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet Nb ₁ Mo ₂ : (a) Movilidad vs Corriente para varios campos constantes, (b) Movilidad vs Campo para varias corrientes constantes.....	110
Figura 3.42. Movilidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet Nb ₀ Mo ₃ : (a) Movilidad vs Corriente para varios campos constantes, (b) Movilidad vs Campo para varias corrientes constantes.....	110

- Figura 3.43.** Movilidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet $\text{Nb}_{1.5}\text{Mo}_{1.5}$: (a) Movilidad vs Corriente para varios campos constantes, (b) Movilidad vs Campo para varias corrientes constantes. 111
- Figura 3.44.** Gráficos de los Resultados de Movilidad, de Tiempo Libre Medio, y de Recorrido Libre Medio de las Cintas de $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3..$ 114
- Figura 3.45.** Amplitud Hall AC en función del Campo Magnético y de la Frecuencia para la Cinta Finemet Nb_3Mo_0 : (a) Amplitud vs Campo para varias frecuencias constantes, (b) Amplitud vs Frecuencia para varios campos constantes..... 117
- Figura 3.46.** Amplitud Hall AC en función del Campo Magnético y de la Frecuencia para la Cinta Finemet Nb_1Mo_2 : (a) Amplitud vs Campo para varias frecuencias constantes, (b) Amplitud vs Frecuencia para varios campos constantes..... 117
- Figura 3.47.** Amplitud Hall AC en función del Campo Magnético y de la Frecuencia para la Cinta Finemet Nb_0Mo_3 : (a) Amplitud vs Campo para varias frecuencias constantes, (b) Amplitud vs Frecuencia para varios campos constantes..... 118
- Figura 3.48.** Amplitud Hall AC en función del Campo Magnético y de la Frecuencia para la Cinta Finemet $\text{Nb}_{1.5}\text{Mo}_{1.5}$: (a) Amplitud vs Campo para varias frecuencias constantes, (b) Amplitud vs Frecuencia para varios campos constantes..... 118
- Figura 3.49.** Densidad de Portadores en función del Campo Magnético y de la Frecuencia para la Cinta Finemet Nb_3Mo_0 : (a) Densidad vs Campo para varias frecuencias constantes, (b) Densidad vs Frecuencia para varios campos constantes..... 119
- Figura 3.50.** Densidad de Portadores en función del Campo Magnético y de la Frecuencia para la Cinta Finemet Nb_1Mo_2 : (a) Densidad vs Campo para varias frecuencias constantes, (b) Densidad vs Frecuencia para varios campos constantes..... 120
- Figura 3.51.** Densidad de Portadores en función del Campo Magnético y de la Frecuencia para la Cinta Finemet Nb_0Mo_3 : (a) Densidad vs Campo para varias frecuencias constantes, (b) Densidad vs Frecuencia para varios campos constantes..... 120
- Figura 3.52.** Densidad de Portadores en función del Campo Magnético y de la Frecuencia para la Cinta Finemet $\text{Nb}_{1.5}\text{Mo}_{1.5}$: (a) Densidad vs Campo para varias frecuencias constantes, (b) Densidad vs Frecuencia para varios campos constantes. 121

Figura 3.53. Densidad de Portadores en función del Campo y de la Frecuencia de las Cintas $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$: (a) Densidad vs Campo para una frecuencia de 1000 mHz, (b) Densidad vs Frecuencia para un campo de 800 mT.	122
Figura 3.54. Gráficos de los Resultados Hall AC de Densidad, de Coeficiente Hall, de Movilidad, de Tiempo Libre Medio y Recorrido Libre Medio de las Cintas de Finemet..	126
Figura 3.55. Magnetización en función del Campo Magnético de las Cintas $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$	128
Figura 3.56. Susceptibilidad Real en función del Campo Magnético para una frecuencia de 3000 Hz de las Cintas $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$	129
Figura 3.57. Susceptibilidad Imaginaria en función del Campo Magnético para una frecuencia de 3000 Hz de las Cintas $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$	129
Figura A.1. Ventana del Sistema Hall variando corriente (Cuatro Puntas).....	150
Figura A.2. Ventana del Sistema Hall variando campo (Cuatro Puntas).	150
Figura A.3. Ventana del Sistema de Medidas de Resistividad (Van Der Pauw).	152
Figura A.4. Ventana del Sistema Hall variando corriente (Van Der Pauw).....	153
Figura A.5. Ventana del Sistema Hall variando campo (Van Der Pauw).	153
Figura A.6. Ventana del Sistema Hall variando campo (Técnica AC).	155
Figura A.7. Ventana del Sistema Hall variando frecuencia (Técnica AC).	155

Lista de tablas

Tabla 1.1. Resistividad ρ en $\Omega \cdot m$ de algunos materiales a temperatura ambiente (20°C). .	21
Tabla 3.1. Resultados de Resistencia Superficial y de Resistividad para el Circuito de Baja Resistencia.	60
Tabla 3.2. Resultados de Resistencia Superficial y de Resistividad para el Circuito de Alta Resistencia.	61
Tabla 3.3. Resultados de Densidad de Portadores y de Coeficiente Hall para la Primera Muestra de Cobre: (a) Resultados variando Corriente, (b) Resultados variando Campo....	67
Tabla 3.4. Resultados de Movilidad, de Tiempo Libre Medio, y de Recorrido Libre Medio para la Primera Muestra de Cobre: (a) Resultados variando Corriente, (b) Resultados variando Campo.....	69
Tabla 3.5. Resultados de Resistencia Superficial y de Resistividad para segunda Muestra de Cobre.....	71
Tabla 3.6. Resultados de Densidad de Portadores y de Coeficiente Hall para la Cinta de $Co_{71}Fe_4B_{15}Si_{10}$: (a) Resultados variando Corriente, (b) Resultados variando Campo.	78
Tabla 3.7. Resultados de Resistencia Superficial y de Resistividad para la Cinta Magnética de $Co_{71}Fe_4B_{15}Si_{10}$	80
Tabla 3.8. Resultados de Movilidad, de Tiempo Libre Medio, y de Recorrido Libre Medio para la Cinta de $Co_{71}Fe_4B_{15}Si_{10}$: (a) Resultados variando Corriente, (b) Resultados variando Campo.....	81
Tabla 3.9. Resultados de Densidad de Portadores y de Coeficiente Hall para la Cinta de $Co_{64}Fe_{21}B_{15}$: (a) Resultados variando Corriente, (b) Resultados variando Campo.....	86
Tabla 3.10. Resultados de Movilidad, de Tiempo Libre Medio, y de Recorrido Libre Medio para la Cinta de $Co_{64}Fe_{21}B_{15}$: (a) Resultados variando Corriente, (b) Resultados variando Campo.....	88
Tabla 3.11. Resultados de Resistencia Superficial y de Resistividad para la Cinta Magnética de $Co_{64}Fe_{21}B_{15}$	91

Tabla 3.12. Resultados de Densidad de Portadores y de Coeficiente Hall para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$: (a) Resultados variando Campo, (b) Resultados variando Frecuencia.	98
Tabla 3.13. Resultados de Movilidad, de Tiempo Libre Medio, y de Recorrido Libre Medio para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$: (a) Resultados variando Campo, (b) Resultados variando Frecuencia.....	98
Tabla 3.14. Resultados de Densidad de Portadores y de Coeficiente Hall para las Cintas de $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$: (a) Resultados variando Corriente, (b) Resultados variando Campo.	107
Tabla 3.15. Resultados de Resistencia Superficial y Resistividad de las Cintas de $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$	108
Tabla 3.16. Resultados de Resistividad obtenidos en la Universidad de Buenos Aires de las Cintas $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$	109
Tabla 3.17. Resultados de Movilidad, de Tiempo Libre Medio y de Recorrido Libre Medio para las Cintas de $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$: (a) Resultados variando Corriente, (b) Resultados variando Campo.	113
Tabla 3.18. Resultados de Densidad de Portadores, Coeficiente Hall, Resistividad, Movilidad, y de Tiempo y Recorrido Libre Medio para la Muestra de Cobre, las Cintas Basadas en Cobalto, y para las Cintas tipo Finemet.....	115
Tabla 3.19. Resultados de Densidad de Portadores, Coeficiente Hall, Movilidad, Tiempo y Recorrido Libre Medio para las Cintas de $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$ obtenidos con la Técnica Hall AC: (a) Resultados variando Campo, (b) Resultados variando Frecuencia.....	125
Tabla 3.20. Resultados de Pico de Susceptibilidad Real e Imaginaria para las Cintas de $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$	130
Tabla 3.21. Resultados de Densidad de Portadores, de Magnetización de Saturación, y de Pico de Susceptibilidad Real para las Cintas de $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$	131

Introducción

En este trabajo se plantea la construcción de un sistema para la medida de efecto hall DC y AC, la cual es una herramienta experimental por medio de la cual se puede obtener información relacionada con las propiedades de transporte eléctrico de los materiales, como el número de portadores de carga, la movilidad, la resistividad, entre otros [2,8]. Inicialmente se verá la teoría correspondiente al efecto Hall, las técnicas de medida, y sus aplicaciones tecnológicas, como los sensores de posición sin contacto y los medidores de campo magnético [22,36].

Luego se verán las características principales del sistema de efecto Hall construido, tanto de hardware como de software, y las características del portamuestras. Para el desarrollo de esta técnica se hizo una revisión de los sistemas usados en diferentes laboratorios de universidades como la U. de Buenos Aires de Argentina y la U. Federal de Pernambuco de Brasil, también se revisaron los sistemas de medida utilizados por empresas comerciales como Lakeshore y Accent [14,42].

Finalmente se hace un estudio del efecto hall a temperatura ambiente en algunos materiales conductores y magnéticos, con la técnica desarrollada, para determinar la densidad y la movilidad de portadores de carga de dichos materiales en función de parámetros como la corriente, el campo magnético, la frecuencia y los contenidos de material. El objetivo de estas medidas es la de verificar el grado de desempeño y funcionamiento de la técnica de efecto Hall DC y AC diseñada.

1. Teoría del efecto Hall, técnicas de medida y aplicaciones

En el presente capítulo se verán los fundamentos teóricos del fenómeno de efecto Hall DC y AC, y la teoría de cantidades físicas como la movilidad y la conductividad de un material conductor. También se presentan tres técnicas de medidas Hall. La primera se llamará *Técnica de Cuatro Puntas*, en esta técnica se realizan cuatro contactos eléctricos sobre la muestra de material estudiado, dos para suministro de corriente y los otros dos para medida de voltaje; con esta técnica se pueden conocer propiedades eléctricas del material como la densidad de portadores de carga. Segunda es la *Técnica de Van Der Pauw*, esta técnica es similar a la anterior, la diferencia radica en que en esta se llevan a cabo una serie de inversiones (o conmutaciones) de corriente y medida de voltaje sobre la muestra para campos magnéticos en dirección positiva y negativa, esto se hace para cancelar efectos no deseados como voltajes debidos a la dispersión de la corriente y efectos termomagnéticos, lo que le da una ventaja sobre la primera técnica; además de la concentración de portadores, permite conocer la resistividad y la movilidad del material; en esta sección también se discutirá las diferentes geometrías que debe poseer la muestra para obtener mejores resultados en las medidas. La tercera técnica es la *Técnica AC*, esta difiere de las anteriores en que se suministra una corriente alterna (AC) a la muestra, esto permite conocer propiedades eléctricas dinámicas del material. También se verán las diferentes fuentes de error que pueden causar una mala medida del voltaje Hall, entre ellas se encuentran efectos fotoeléctricos y contactos no simétricos. Después se presentan algunos tipos de contactos que se pueden realizar sobre la muestra que se va a estudiar, entre estos contactos están el realizado mediante pintura conductora y el elaborado mediante soldadura. Finalmente, se

describen algunas aplicaciones del efecto Hall, entre ellas están los sensores de corriente, la medición de campo magnético, y los sensores de posición.

1.1 El efecto Hall

1.1.1 Teoría del Efecto Hall, Movilidad y Conductividad

El efecto Hall fue descubierto por el físico estadounidense Edwin T. Hall en 1879 [1]. Este fenómeno consiste en que si una corriente eléctrica fluye por una lámina de material (conductor, semiconductor) de forma rectangular, y si dicho material se sitúa en el seno de un campo magnético aplicado de manera perpendicular al plano de la lámina, una fuerza (fuerza de Lorentz) actúa sobre los portadores de carga del material. Esta fuerza hace que los portadores de carga se acumulen en el extremo de $+x$ o $-x$ de la lámina (de acuerdo con el sentido de la corriente y del campo aplicado), de tal forma que aparece un voltaje, llamado voltaje Hall, entre dos puntos situados a un lado y a otro de la lámina [2-4]. El estudio del Efecto Hall se utiliza para obtener información sobre el tipo y número de portadores de carga, movilidad y mecanismos de dispersión de materiales conductores [5].

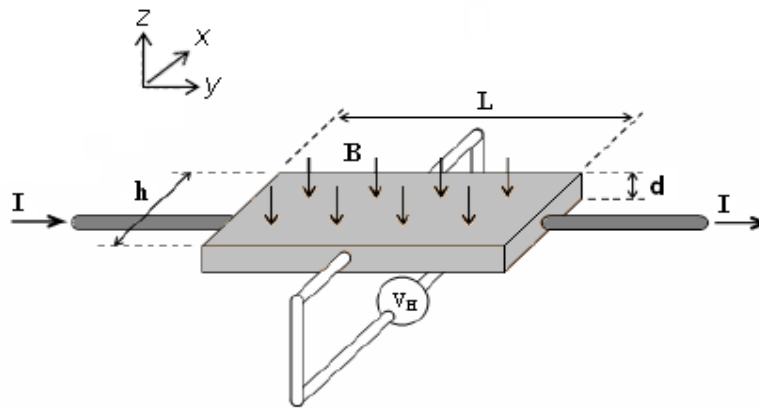


Figura 1.1. Voltaje Hall (V_H) medido sobre una lámina de material conductor, B campo magnético aplicado, I corriente, d espesor de la lámina.

Ahora, supóngase que por un conductor que tiene la forma de una placa rectangular circula una corriente eléctrica de densidad \vec{j} , ver figura 1.1. Si se coloca la placa en un campo magnético \vec{B} perpendicular a la dirección de corriente, actuara sobre cada carga q libre

del material la fuerza de Lorentz.

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

Es decir, por acción de esta fuerza los portadores se desvían en dirección perpendicular a la de la densidad de corriente y del campo magnético. Si los portadores son cargas positivas (+ q), su velocidad (\vec{v}) tendrá la dirección de la corriente I , mientras que si son cargas negativas (- q) su velocidad ($-\vec{v}$) será opuesta a I . Los portadores de carga positiva se desviarán en dirección de $+x$ y los de carga negativa en $-x$. Al haber un desplazamiento neto de portadores en una dirección y al ser el material neutro, aparece una carga neta igual y opuesta en el otro lado del material, dando lugar a un campo eléctrico transversal E_H , y por tanto a una diferencia de potencial, que recibe el nombre de tensión Hall (V_H).

Este proceso de separación de cargas continúa hasta que la fuerza eléctrica que ejerce el campo eléctrico transversal (E_H) sobre los portadores de carga libres equilibre la fuerza de Lorentz:

$$qE_H = qvB \quad (2)$$

Si el ancho de la muestra es " h ", la diferencia de potencial de Hall (V_H) entre las caras opuestas vendrá dada por la siguiente expresión:

$$V_H = E_H h = vBh \quad (3)$$

Considerando que la relación entre la densidad de corriente \vec{j} , y la velocidad promedio de los portadores, $\langle \vec{v} \rangle$, es:

$$\vec{j} = qn\langle \vec{v} \rangle \quad (4)$$

Donde n representa la concentración de los portadores de carga, la tensión Hall se puede expresar como:

$$V_H = \frac{1}{qn} jBh = R_H jBh \quad (5)$$

Siendo R_H el llamado coeficiente Hall, de signo negativo cuando los portadores son electrones y de signo positivo cuando son huecos.

Expresando esta igualdad en términos de la intensidad de corriente I :

$$j = \frac{I}{A} = \frac{I}{h \cdot d} \quad (6)$$

$$V_H = R_H B \frac{I}{d} \quad (7)$$

Donde h representa el ancho de la placa y d su espesor.

Por otra parte, debido al campo eléctrico \vec{E} (paralelo a la corriente eléctrica), los portadores están sometidos a una fuerza:

$$\vec{F} = m\vec{a} = q\vec{E} \quad (8)$$

Si se denomina τ al tiempo medio entre dos choques de cada portador (tiempo libre medio), la velocidad media de los portadores vendrá dada por:

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{q\tau}{m} \vec{E} = \mu \vec{E} \quad (9)$$

$$\mu = \frac{q\tau}{m} \quad (10)$$

Donde μ recibe el nombre de movilidad de los portadores de carga q y masa m [6].

Basándose en la ley de Ohm, la conductividad eléctrica σ puede ser expresada como sigue:

$$\sigma = \frac{j}{E} = qn\mu \quad (11)$$

La conductividad en materiales semiconductores exhibe una dependencia característica con la temperatura, ver figura 1.2. Se distinguen en general tres rangos de temperatura: i) A temperaturas bajas se tiene *conducción extrínseca*. En este régimen, según aumenta la

temperatura, aumenta el número de portadores por activación térmica de las impurezas. ii) A temperaturas moderadas se tiene una zona de *deplexión de las impurezas*, en la que una vez activadas todas las impurezas, el aumento de temperatura no produce un cambio apreciable en el número de portadores. iii) A altas temperaturas predomina la *conducción intrínseca*. En este rango se transfieren portadores desde la banda de valencia a la de conducción, a través del intervalo de energía prohibido, mediante excitación térmica.

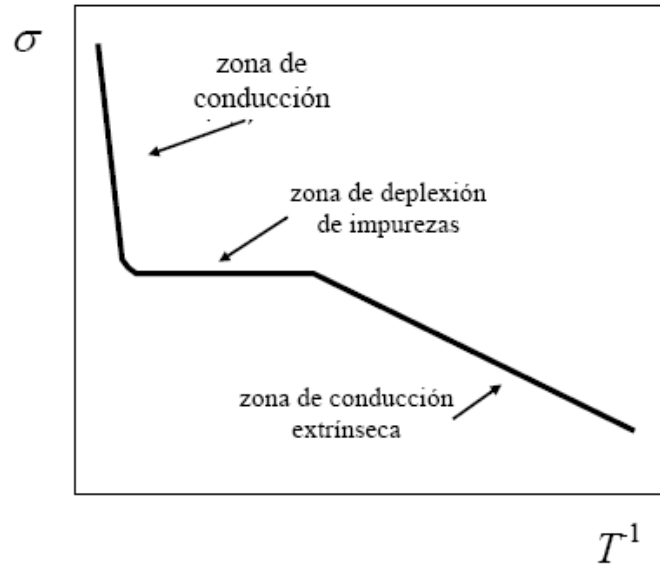


Figura 1.2. Conductividad en función del inverso de la temperatura para semiconductores.

La conductividad en función de la temperatura, T , para un régimen de conducción de tipo intrínseco (temperaturas elevadas) se puede expresar como:

$$\sigma = \sigma_{\infty} e^{\frac{-E_g}{2kT}} \quad (12)$$

Donde k es la constante de Boltzmann y es igual a $8.625 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$, σ_{∞} es la conductividad a temperaturas altas y E_g es la energía del gap o diferencia de energías entre el mínimo de la banda de conducción E_c y el máximo de la banda de valencia E_v . A partir de esta expresión se puede encontrar el valor de la conductividad a temperatura ambiente, que se denominará σ_0 . De igual modo este valor σ_0 puede despejarse a partir de:

$$\sigma_0 = \frac{l}{R_0 S} = \frac{\mu_{H0}}{R_H} \quad (13)$$

Donde R_0 representa la resistencia de la placa a temperatura ambiente, l la longitud de la placa, S el área de su sección transversal y μ_{H0} la movilidad Hall a temperatura ambiente.

1.1.2 El Coeficiente Hall y los Portadores de Carga

Para desarrollar una expresión simple para el voltaje Hall (ver figura 1.1), se asumirá inicialmente que los portadores de carga son electrones, y que tienen la misma velocidad de desplazamiento v_n y el mismo tiempo de relajación τ_c [7,8]. La fuerza resultante que actúa sobre cualquier electrón está dada por la ecuación de la fuerza de Lorentz:

$$\vec{F} = -q(\vec{E} + \vec{v}_n \times \vec{B}) \quad (14)$$

Por otra parte se conoce que para un campo eléctrico aplicado:

$$\vec{F} = m_e \frac{d\vec{v}_n}{dt} + m_e \frac{\vec{v}_n}{\tau_c} \quad (15)$$

Donde m_e es la masa del electrón. En estado estable el primer término de la ecuación (15) es cero y combinando las dos ecuaciones anteriores se llega a que:

$$\vec{E} + \vec{v}_n \times \vec{B} = -\frac{\vec{v}_n}{\mu_n} \quad \text{donde} \quad \mu_n = \frac{q\tau_c}{m_e} \quad (16)$$

Siendo μ_n la movilidad electrónica. Si ahora se considera que la densidad de corriente se puede expresar mediante $\vec{J} = -qn_0\vec{v}_n$, donde n_0 es la densidad de electrones, entonces la ecuación (16) se puede modificar para expresar el campo eléctrico como:

$$\vec{E} = \frac{\vec{J}}{q\mu_n n_0} + \frac{\vec{J}}{qn_0} \times \vec{B} \quad (17)$$

La ecuación anterior se puede simplificar si se observa que $B_x = B_y = 0$ y que $J_x = J_z = 0$. Bajo estas condiciones la ecuación (17) se reduce a tener dos ecuaciones escalares:

$$E_y = J_y / \sigma \quad (18)$$

$$E_x = -J_y B_z / qn_0 = -\mu_n B_z E_y \quad (19)$$

La relación (18) es el establecimiento de la ley de Ohm, siendo σ la conductividad, mientras que la relación (19) expresa la situación de que en la dirección x la fuerza sobre un electrón debido al campo magnético ($q\mu_n B_z E_y$) esta equilibrada por una fuerza ($-qE_x$) debido al campo Hall. La ecuación (19) generalmente se escribe como:

$$E_x = R_H J_y B_z \quad (20)$$

Donde $R_H = -1/qn_0 \quad (21)$

Esta última expresión se conoce como el coeficiente Hall (R_H). Un análisis similar se lleva a cabo para el caso en el que los portadores son huecos (p en lugar de n), para este caso las ecuaciones (20) y (21) quedan expresadas de la siguiente manera:

$$E_x = R_H J_y B_z = \mu_p B_z E_y \quad (22)$$

Con $R_H = 1/qp_0 \quad (23)$

Donde p_0 es la concentración de huecos del material. El voltaje Hall y el campo de Hall se relacionan por medio de:

$$V_H = E_x h \quad (24)$$

Siendo h el ancho de la muestra. El coeficiente Hall se puede medir conociendo V_H , J_y y B_z .

A partir del coeficiente Hall y de la resistividad (ρ) se puede encontrar el tiempo de relajación ó tiempo libre medio [55]:

$$\tau_c = m_e |R_H| / \rho q \quad (25)$$

También se puede calcular el recorrido libre medio (ℓ) a partir de τ_c y de la velocidad térmica ($v_T = 9.5 \times 10^4$ m/s para 300 K):

$$\ell \approx v_T \tau_c \quad (26)$$

Para materiales semiconductores el coeficiente Hall se calcula incluyendo una distribución de velocidades (diferente velocidad de desplazamiento), además de que pueden estar presentes simultáneamente portadores positivos y negativos. Este cálculo se puede hacer a partir de la ecuación de Boltzmann en estado estacionario con el término de la fuerza de

Lorentz [9], o utilizando la ecuación de movimiento de una carga en presencia de campos eléctrico y magnético uniformes (empleando estadística de Maxwell-Boltzmann) [8]. Después de estos cálculos se llega a la siguiente expresión del coeficiente Hall para un semiconductor no extrínseco:

$$R_H = \frac{3\pi}{8q} \frac{p_0 - b^2 n_0}{(bn_0 + p_0)^2} \quad \text{donde} \quad b = \mu_n / \mu_p \quad (27)$$

Para un semiconductor intrínseco $p_0 = n_0 = n_i$ y (27) se reduce a:

$$R_H = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{n_i q} \frac{1-b}{1+b} \quad (28)$$

Para la determinación de (27) se tuvo en cuenta el efecto de la magnetorresistencia, para un semiconductor con superficies de energía esféricas (tanto en la banda de conducción como en la de valencia) y con una sola variedad de huecos y de electrones.

1.1.3 Portadores de Carga en Metales

Se conoce (hoy) que la conducción eléctrica en los metales se debe únicamente al movimiento de los electrones. Una gran catástrofe para el modelo del electrón libre en sólidos fue la observación de coeficientes Hall positivos: ¿cómo puede aparecer un movimiento de portadores de carga positivos en un metal? El misterio se resuelve mediante la aplicación de la teoría cuántica al problema, lo cual lleva a la idea de electrón 'huecos'. Los huecos son una forma de describir el *comportamiento colectivo de muchos electrones* mediante la introducción de partículas ficticias [55].

El concepto de un electrón hueco (del inglés “electron hole”) es, de hecho, muy sutil. A continuación, se explora la idea con el fin de contar con un poco de comprensión más completa. Para esto, primero se deben señalar algunos de los rasgos más sobresalientes del enfoque cuántico.

Cuando se resuelve para las funciones de onda del electrón en un potencial periódico se encuentra la energía de los estados propios $\varepsilon_n(\mathbf{k})$ que pertenecen a varias *bandas*, cada una

marcada por un índice n . Cada banda tiene un mínimo y un máximo de energía posible. Para cada banda el vector de onda \mathbf{k} varía de manera continua sobre un espacio \mathbf{K} . Sin embargo, la estructura *espacial* de los problemas de potencial periódico dicta que las energías $\varepsilon_n(\mathbf{k})$ son periódicas en la red 'reciproca' del espacio \mathbf{K} . Por lo tanto, solamente los vectores de onda \mathbf{k} que estén confinados en una llamada celda primitiva (primera Zona de Brillouin) de esta red necesitan ser identificados en un estado único de la banda *enésima*.

Ahora, se examinará cómo los electrones que ocupan los diferentes estados de una determinada banda responden cuando campos eléctricos y magnéticos externos \mathbf{E} y \mathbf{B} son aplicados. Para esto, se construyeron paquetes de onda localizados en el espacio cerca de $\mathbf{r}(t)$, y en el vector de onda cerca de $\mathbf{k}(t)$. La velocidad de una función de onda localizada viene dada por la velocidad de grupo. El resultado es una órbita semi-clásica $[\mathbf{r}(t), \mathbf{v}(t)]_n$ asociada a una energía $\varepsilon_n(\mathbf{k})$ y a un vector de onda \mathbf{k} en el tiempo t . El índice n de banda es una constante del movimiento. La ecuación de movimiento de los paquetes de onda es:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}(t) = \vec{v}_n(\vec{k}) = \frac{1}{\hbar} \nabla_{\vec{k}} \varepsilon_n \quad y \quad (29)$$

$$\hbar \frac{d\vec{k}}{dt} = \vec{F}_{ext} = -e[\vec{E} + \vec{v}_n(\vec{k}) \times \vec{B}] \quad (30)$$

Nótese que $\hbar\mathbf{k}$, llamado momento del cristal, no es el momento real de un electrón que sigue una órbita ya que su cambio de velocidad es determinado solamente por la fuerza *externa* \mathbf{F}_{ext} . Efectos debidos a fuerzas *internas* (el potencial periódico) ya han sido tenidos en cuenta en la solución de la estructura de banda $\varepsilon_n(\mathbf{k})$.

Ahora se puede preguntar: "¿Cómo se comportan los electrones cercanos de la parte superior o inferior de una banda cuando un campo electromagnético externo es aplicado?"

En primer lugar, considérese la respuesta de los electrones que ocupan orbitales con energías cercanas al máximo de la banda, ε_{max} . Cerca de un máximo, la energía puede ser estimada por el término inicial de una expansión de Taylor:

$$\varepsilon_n(\vec{k}) \approx \varepsilon_{\max} - \frac{\hbar^2}{2m^*} (\vec{k} - \vec{k}_m)^2 \quad (31)$$

Donde \mathbf{k}_m es el vector de onda en el que la energía de banda es máxima. El coeficiente cuadrático de la expansión está escrito en términos del parámetro m^* (positivo), llamado la masa efectiva del electrón. ¿Cómo evoluciona una órbita semi-clásica con \mathbf{k} cerca de \mathbf{k}_m en presencia de una fuerza electromagnética externa? La velocidad se convierte en:

$$\vec{v}_n(\vec{k}) = \frac{1}{\hbar} \nabla_{\vec{k}} \varepsilon_n \approx -\frac{\hbar(\vec{k} - \vec{k}_m)}{m^*} \quad (32)$$

Por lo tanto la aceleración es:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}_n(\vec{k})}{dt} \approx -\frac{\hbar}{m^*} \frac{d\vec{k}}{dt} \quad (33)$$

Para órbitas cercanas a la parte superior de la banda, la aceleración es *opuesta* en dirección al cambio de los vectores de onda. De las ecuaciones semi-clásicas del movimiento, se tiene:

$$(-m^*)\vec{a} \approx (-e)[\vec{E} + \vec{v}_n(\vec{k}) \times \vec{B}] \quad (34)$$

Por lo tanto, la evolución temporal de la órbita se puede ver como el movimiento de un electrón con una masa negativa o mejor: como una partícula positiva de masa positiva m^* .

Considérese ahora el comportamiento de las órbitas con energías cercanas del mínimo de la banda. Ahora la relación de dispersión es aproximada por:

$$\varepsilon_n(\vec{k}) \approx \varepsilon_{\min} + \frac{\hbar^2}{2m^\diamond} (\vec{k} - \vec{k}_m) ^2 \quad (35)$$

Con algunas posibles diferencias (pero aún positivo) de masa efectiva m^\diamond . Órbitas en la parte inferior de la banda y por lo tanto el comportamiento de los electrones es de forma:

$$(+m^\diamond)\vec{a} \approx (-e)[\vec{E} + \vec{v}_n(\vec{k}) \times \vec{B}] \quad (36)$$

En resumen:

Hecho I: *Los electrones que ocupan orbitales cerca del mínimo de la banda responden a campos externos como partículas de carga $-e$ y masa m^\diamond . Los electrones que ocupan orbitales cerca del máximo de la banda responden a campos externos como partículas de carga $+e$ y masa m^* .*

Ahora se puede construir la estructura electrónica del sólido llenando orbitales con el número de electrones disponibles utilizando la estadística de Fermi-Dirac; un orbital (de números cuánticos n , \mathbf{k} , y espín $s = \uparrow$ o \downarrow) ya sea ocupado o desocupado en el tiempo t por un electrón. El número total de orbitales ocupados debe ser constante.

La contribución a la densidad de corriente asociada con un electrón que ocupa dicho estado es simplemente $(-e)\mathbf{v}_n(\mathbf{k})$. La contribución finita a \mathbf{J} debido a una región totalmente ocupada Ω del espacio \mathbf{K} en la banda *enésima* es:

$$\vec{J} = (-e) \int_{\Omega} \frac{d^3\vec{k}}{8\pi^3} \vec{v}_n(\vec{k}) \quad (37)$$

El $1/8\pi^3$ es un factor de densidad de estados del espacio \mathbf{K} que aparece cuando se hace una aproximación continua, y no tiene por qué ser una preocupación. La integral implícita incluye una suma sobre el espín de estados cuánticos.

Ahora bien, no es demasiado difícil de demostrar (usando simetría del tiempo-inverso de la ecuación de onda) que por cada vector de onda \mathbf{k} en la primera Zona de Brillouin, $\mathbf{v}(-\mathbf{k}, \uparrow) = -\mathbf{v}(\mathbf{k}, \downarrow)$. El corolario inmediato es que la densidad de corriente debida a una banda *totalmente ocupada* es cero:

$$(-e) \int_{band} \frac{d^3\vec{k}}{8\pi^3} \vec{v}_n(\vec{k}) = 0 \quad (38)$$

Para una banda que es sólo ocupada parcialmente, se puede usar este hecho para escribir el

Hecho II:

$$\vec{J} = (-e) \int_{ocupado} \frac{d^3\vec{k}}{8\pi^3} \vec{v}_n(\vec{k}) = (+e) \int_{desocupado} \frac{d^3\vec{k}}{8\pi^3} \vec{v}_n(\vec{k}) \quad (39)$$

Por lo tanto, la densidad de corriente asociada con un grupo de electrones que ocupan determinados orbitales de una banda es lo mismo **como si** hubiera electrones de carga positiva (huecos) ocupando los orbitales desocupados del *electrón*. **Además**, en circunstancias normales donde los huecos están cerca del máximo de la banda, estos orbitales huecos responden a campos externos como partículas de carga positiva (Hecho I). Es de esta manera que las bandas casi llenas presentan densidades de corriente de huecos.

1.1.4 El Efecto Hall AC

Ahora supóngase que se reemplaza la densidad de corriente continua (DC) aplicada a la placa conductora en el efecto hall ordinario por una densidad de corriente j_x variable en el tiempo t , de la forma:

$$j_x = j_{x0} \sin(\omega t) \quad (40)$$

Donde j_{x0} es la densidad de corriente máxima alcanzada por señal que atraviesa el material, y ω su frecuencia angular. Se sabe que el voltaje Hall V_H es variable también en el tiempo con una señal de la misma frecuencia pero con fase distinta [10-12]. Este corrimiento en la señal se debe a la reactancia del material y puede arrojar información extra sobre las propiedades del mismo. Luego el voltaje Hall se puede escribir como:

$$V_H = V_{H0} \sin(\omega t - \phi) \quad (41)$$

Donde V_{H0} es el voltaje generado en la muestra por causa de la corriente j_{x0} y ϕ es el ángulo de fase debido a reactancia de la muestra. Se puede decir análogamente que la impedancia Hall Z_H , se puede escribir como:

$$\|Z_H\| = \frac{V_{H0}}{I_{x0}} = \sqrt{R_H^2 + X^2} \quad (42)$$

$$\text{Arg}[Z_H] = \phi = \text{arcTan}\left(\frac{R_H}{X}\right) \quad (43)$$

Donde la parte real de la impedancia corresponde al coeficiente Hall ordinario, $\text{Re}[Z_H]=R_H$, y la parte imaginaria, $\text{Im}[Z_H]$, es la reactancia del material, X . Las variables conocidas que provocan una impedancia son la resistividad y el efecto piel [13].

El *efecto piel* es definido como una distancia δ a través de la cual una onda plana viajera decrece en un factor de e^{-1} . Una descripción fenomenológica del *efecto piel* fue hecha por Landau y Lifshitz. En esta descripción, esa distancia se expresa como:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \quad (44)$$

Donde ρ es la resistividad, μ es la permeabilidad del material y ω es la frecuencia angular de la onda plana viajera.

1.2 Técnicas de medida del efecto Hall

1.2.1 La Técnica de Cuatro Puntas

Existe una gran variedad de equipos comerciales y técnicas desarrolladas en laboratorios para la caracterización de materiales por efecto Hall, esto se debe a que es una técnica ampliamente utilizada para determinar propiedades eléctricas en metales y semiconductores como la concentración de portadores, el tipo de portador, la movilidad, entre otros [5,14]. En semiconductores esta técnica se utiliza para determinar la conductividad y el gap de energía (E_g) del material, pero para esto es necesario contar con un sistema de variación de temperatura. El nombre de Técnica de Cuatro Puntas se debe a que se realizan cuatro contactos sobre la muestra o material estudiado, dos de ellos para el suministro de corriente y los otros dos para la medida del voltaje, estos contactos se realizan en la mitad de cada lado de la muestra, ver figura 1.3. Más adelante se verán las diferentes formas que hay para realizar estos contactos.

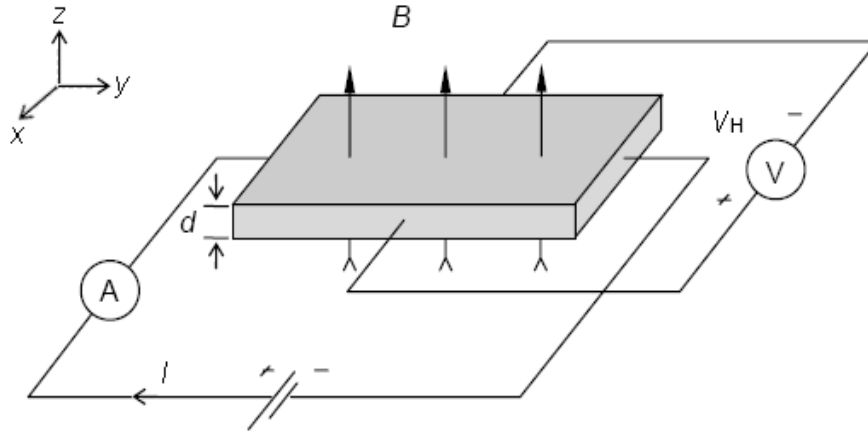


Figura 1.3. Configuración utilizada en la Técnica de Cuatro Puntas para la medida del voltaje Hall.

El voltaje Hall (V_H) depende del tipo de material, de la geometría de la muestra y de parámetros físicos ajustables como la corriente que circula por la muestra (I) y la magnitud del campo magnético (B). La expresión correspondiente a este voltaje es:

$$V_H = \left(\frac{R_H}{d} \right) \cdot I \cdot B \quad (45)$$

Donde R_H es el coeficiente Hall, $R_H = 1/qn$, el cual depende de la concentración ó densidad de portadores n , con carga q , y d corresponde al espesor de la muestra [1-3].

En la ecuación (45) se puede evidenciar la relación lineal que existe entre el voltaje Hall y el campo magnético o entre el voltaje Hall y la corriente. Así mismo es importante rescatar la dependencia inversamente proporcional de este voltaje con la concentración de portadores, a través de R_H , y con el espesor d . Por otro lado, como el signo del coeficiente Hall depende del signo de q , entonces, de aquí viene su importancia en la medición del efecto Hall, ya que determinando este coeficiente, pueden hallarse no sólo la densidad de portadores y el tipo de portador mayoritario que tiene la muestra, sino que también se pueden identificar mecanismos de conducción del material.

Existen dos formas para medir el voltaje o tensión hall, la primera consiste en hacer medidas sobre la muestra variando la corriente, estas medidas se hacen en presencia de un campo magnético constante. Segunda forma consiste en hacer medidas de voltaje sobre el material estudiado variando el campo magnético y manteniendo la corriente constante.

En las figuras 1.4, 1.5 y 1.6 se muestran las gráficas de voltaje Hall en función de la corriente para un campo magnético constante de 250 mT, para muestras de cobre, zinc y germanio respectivamente [15,16].

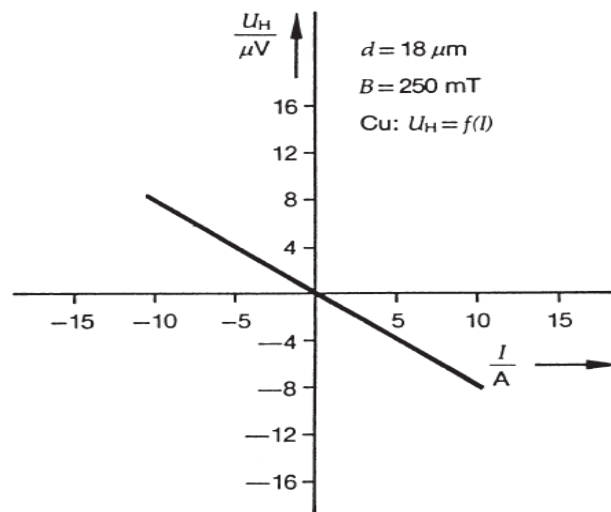


Figura 1.4. Voltaje Hall vs Corriente para un campo constante de 250 mT del cobre.

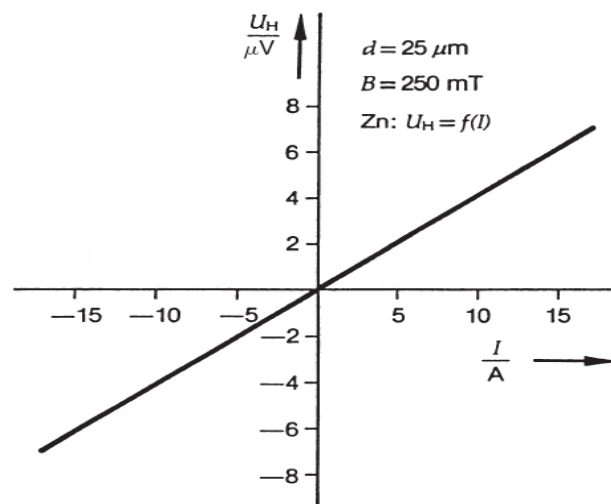


Figura 1.5. Voltaje Hall vs Corriente para un campo constante de 250 mT del zinc.

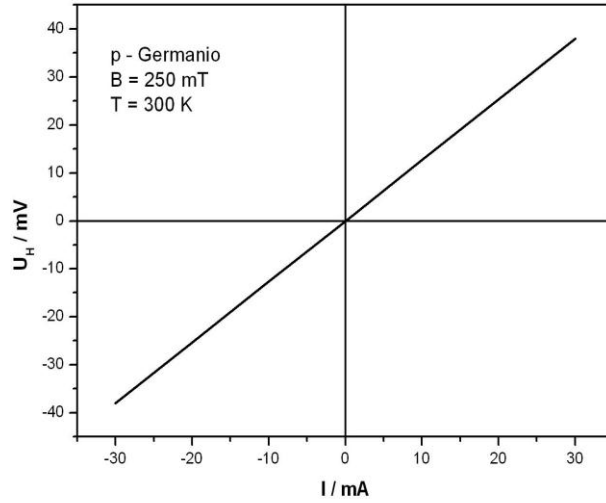


Figura 1.6. Voltaje Hall vs Corriente para un campo constante de 250 mT y una temperatura de 300 K del germanio tipo p.

El coeficiente Hall puede ser calculado a partir de estas gráficas de voltaje Hall contra corriente. Observando la ecuación (45) se puede deducir que la pendiente m de las rectas de las anteriores gráficas corresponde a $m = R_H B / d$, luego despejando R_H , se tiene que:

$$R_H = \frac{md}{B} \quad (46)$$

De modo que solo basta con conocer la pendiente de las rectas, el espesor de la muestra y el campo magnético aplicado para conocer el valor del coeficiente Hall.

En las figuras 1.7, 1.8 y 1.9 se muestran las gráficas de voltaje Hall en función del campo magnético para una corriente constante de 12 A, para muestras de cobre y zinc, y de 30 mA para una muestra de germanio respectivamente. El coeficiente Hall también puede ser calculado a partir de estas gráficas de voltaje Hall contra campo. De la ecuación (45) se puede ver que la pendiente m de las rectas para corriente constante corresponde a $m = R_H I / d$, luego despejando R_H , se tiene que:

$$R_H = \frac{md}{I} \quad (47)$$

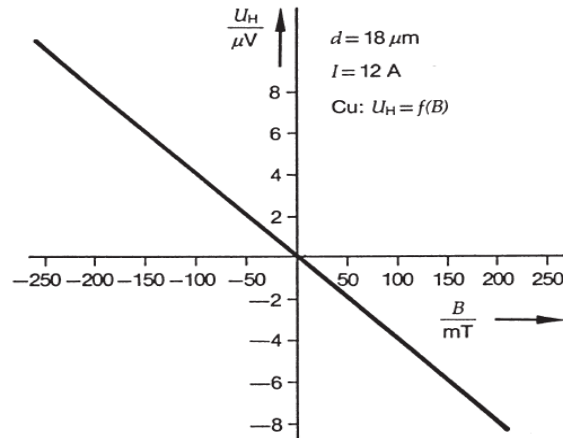


Figura 1.7. Voltaje Hall vs Campo para una corriente constante de 12 A del cobre.

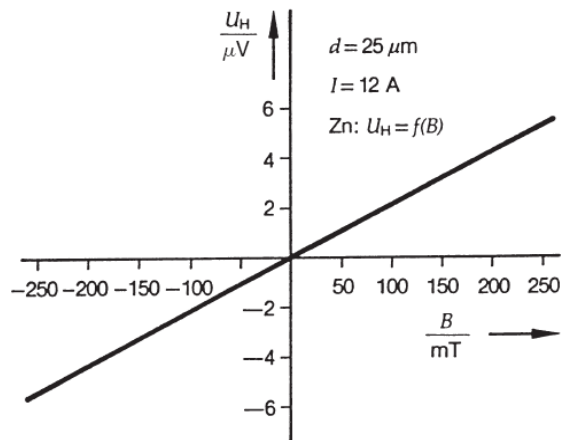


Figura 1.8. Voltaje Hall vs Campo para una corriente constante de 12 A del zinc.

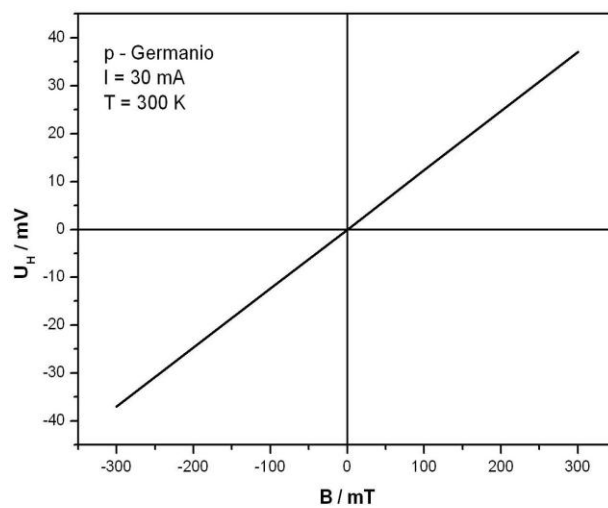


Figura 1.9. Voltaje Hall vs Campo para una corriente constante de 30 mA y una temperatura de 300 K del germanio tipo p.

Los materiales semiconductores presentan una densidad de portadores de carga de varios órdenes inferior a la de los metales y por lo tanto, una constante de Hall de varios ordenes superior. Así, para el caso del Cobre se tiene, $R_H = -5.3 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{C}$ mientras que para el Germanio, $R_H = 7.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{C}$, que resulta ser de varios órdenes superior [15-17]. Esto determina que, manteniendo los mismos parámetros de espesor del material, corriente y campo magnético aplicados, la tensión de Hall es significativamente superior para los semiconductores en relación a los metales.

A partir de los valores de coeficiente Hall hallados (ver ecuaciones 46 y 47) se puede determinar la densidad de portadores del material. La concentración de portadores, n , vendría dada por:

$$n = \frac{1}{q \cdot R_H} \quad (48)$$

Donde q es el valor absoluto de la carga del electrón, $q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$.

También se puede hallar la movilidad de portadores Hall a temperatura ambiente, μ_H , la cual se determina mediante la siguiente expresión:

$$\mu_H = R_H \cdot \sigma_0 \quad (49)$$

En donde σ_0 es la conductividad del material a temperatura ambiente [6]. La conductividad puede ser calculada si se conocen las dimensiones y la resistencia de la muestra estudiada. Esta viene dada por:

$$\sigma_0 = \frac{l}{R_0 \cdot A} = \frac{l \cdot I}{A \cdot V} \quad (50)$$

Siendo, l la longitud del material, R_0 la resistencia a temperatura ambiente, A el área de sección transversal, I la corriente, y V el voltaje.

La conductividad, σ , también puede ser expresada en términos de la resistividad, ρ , como:

$$\sigma = 1/\rho \quad (51)$$

En la tabla 1.1 se presentan las resistividades de algunos materiales, en $\Omega \cdot m$, a temperatura ambiente [18].

Conductores			Semiconductores	grafito	3.5×10^{-5}
Metales	Plata	1.47×10^{-8}		Germanio	0.60
	Cobre	1.72×10^{-8}		Silicio (puro)	2300
	Oro	2.44×10^{-8}	Aislantes	Ámbar	5×10^{14}
	Aluminio	2.75×10^{-8}		Vidrio	$10^{10} - 10^{14}$
	Tungteno	5.25×10^{-8}		Lucita	$> \times 10^{13}$
	Acero	20×10^{-8}		Mica	$10^{11} - 10^{15}$
	Plomo	22×10^{-8}		Cuarzo (fundido)	75×10^{16}
	Mercurio	95×10^{-8}		Azufre	10^{15}
Aleaciones	Manganina	44×10^{-8}		Teflón	$> \times 10^{13}$
	Constantán	49×10^{-8}		Madera	$10^8 - 10^{11}$
	Nikelcromio	100×10^{-8}			

Tabla 1.1. Resistividad ρ en $\Omega \cdot m$ de algunos materiales a temperatura ambiente ($20^\circ C$).

En los materiales semiconductores la conductividad exhibe una dependencia de tipo exponencial con la temperatura, T , esta puede ser expresada como:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\frac{-E_g}{2kT}} \quad (52)$$

Donde k es la constante de Boltzmann, σ_0 es la conductividad a temperatura ambiente y E_g es la energía del gap [6-8].

Si se toman logaritmos en la expresión (52), se tiene que:

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{E_g}{2kT} \quad (53)$$

Por lo tanto, la gráfica del logaritmo de la conductividad eléctrica en función del inverso de la temperatura absoluta es una línea recta, cuya pendiente es proporcional al valor del

intervalo prohibido de energía. En la figura 1.10 se presenta una gráfica del logaritmo de la conductividad contra el inverso de la temperatura para el germanio.

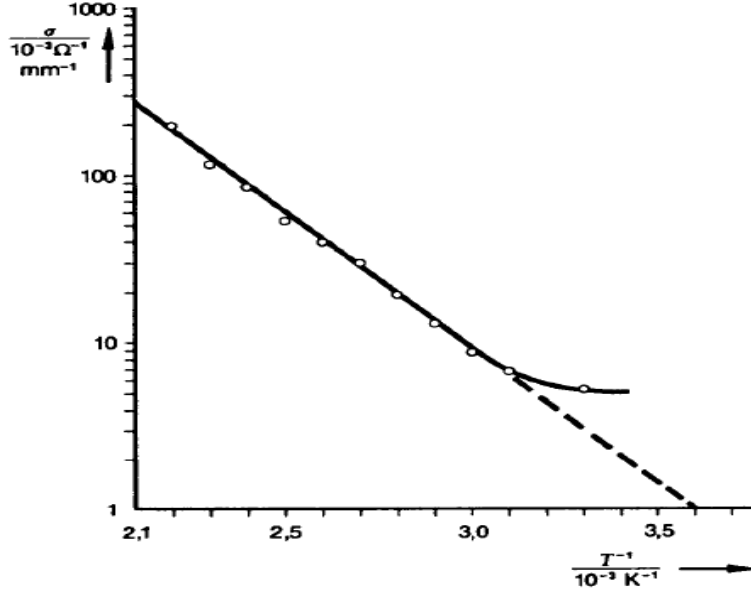


Figura 1.10. Logaritmo de la conductividad del germanio como función del inverso de la temperatura.

En los materiales ferromagnéticos, el efecto hall presenta dos tipos de contribuciones independientes que pueden ser tenidas en cuenta usando la ecuación:

$$\rho_H = R_0 B + \mu_0 R_s M \quad (54)$$

Donde ρ_H es la resistividad hall, y μ_0 es la permeabilidad del vacío. El primer término, representa el efecto hall ordinario (R_0 coeficiente hall ordinario); y el segundo término, proporcional a la magnetización M de la muestra, representa el efecto hall espontáneo (R_s coeficiente hall espontáneo) [19-21]. En la figura 1.11 se presenta una gráfica de resistividad hall en función del campo magnético para un ferromagneto, en ella se puede observar una contribución ordinaria y espontánea inicial, y luego para un cierto valor de campo magnético se alcanza la magnetización de saturación (M_s) del material, y la contribución solo es ordinaria.

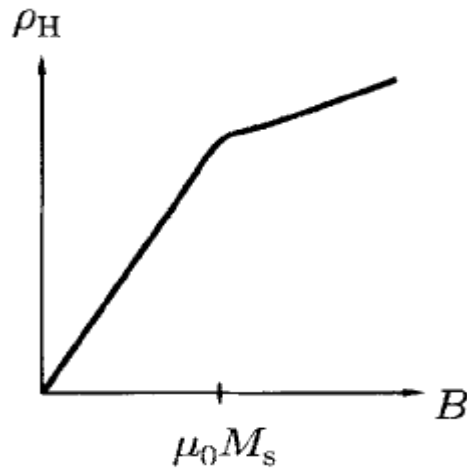


Figura 1.11. Resistividad Hall en función del campo magnético para materiales ferromagnéticos.

1.2.2 La Técnica de Van Der Pauw

El método de Van Der Pauw sirve para hacer mediciones de resistividad y de manera complementaria se adapta para efectuar mediciones de efecto Hall, con las que se pueden hacer estimados de densidad de portadores de carga y movilidad [22,26]. Es ideal para caracterizar películas delgadas. La técnica emplea cuatro contactos eléctricos que deben ir alrededor de la muestra. La película o muestra de material analizada no necesariamente requiere de una geometría especial para ser medida con la técnica de Van Der Pauw. Lo verdaderamente importante es que posea uniformidad en su superficie a medir, en particular su espesor; bajo porcentaje de rugosidad, que no tenga hendiduras y que sea continua. Los contactos deben ser tan pequeños como sea posible y ubicados en la periferia de la película.

En esta técnica, para medidas de resistividad, la corriente se aplica en dos de los contactos que se encuentran en un mismo lado de la película mientras el voltaje es leído en los dos contactos del lado opuesto, así como se observa en la figura 1.12. Este procedimiento debe repetirse alrededor de la muestra de material teniendo en cuenta que la corriente debe invertirse en cada caso. Son ocho configuraciones que deben ser realizadas en la periferia de la muestra sin tener en cuenta la geometría que esta posea. Cuatro de las configuraciones

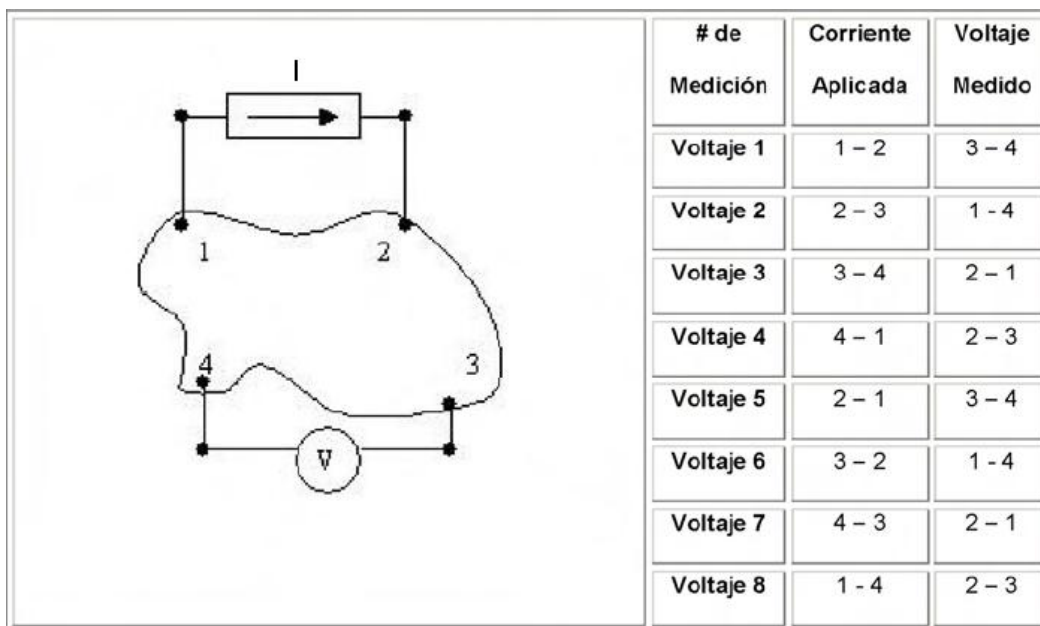


Figura 1.12. Configuración en la Técnica de Van Der Pauw para medidas de resistividad en materiales.

son con la corriente aplicada en una dirección y las demás son con la dirección opuesta. En total se deben hacer ocho lecturas de voltaje, que luego son procesadas en dos grupos. Cada grupo permite evaluar una resistividad o resistencia característica como se verá más adelante [23].

También se puede encontrar el valor del coeficiente de Hall o de la densidad de portadores de carga a través del método Van Der Pauw, solo se debe tener en cuenta que la medición de voltaje ahora se debe hacer de modo cruzado, como se muestra en la figura 1.13. Tomando ocho medidas de voltaje de Hall. Cuatro de los voltajes de Hall son tomados cuando la dirección del campo magnético lleva una dirección, y los cuatro restantes están dados cuando el campo apunta en dirección contraria. El voltaje Hall se obtiene después de realizar una resta de voltajes y finalmente un promedio de ellos [22-28].

Esta técnica descubierta en 1958 por L. J. Van Der Pauw [26], difiere de la técnica de cuatro puntas antes mencionada, y en vez de utilizar la conductividad a temperatura ambiente del material, hace uso de la resistencia superficial de la muestra para el cálculo de la concentración y movilidad de portadores. Además las conmutaciones de corriente y

medida de voltaje permiten la eliminación de efectos termoeléctricos, voltajes debidos a la dispersión de la corriente, entre otras posibles fuentes de error.

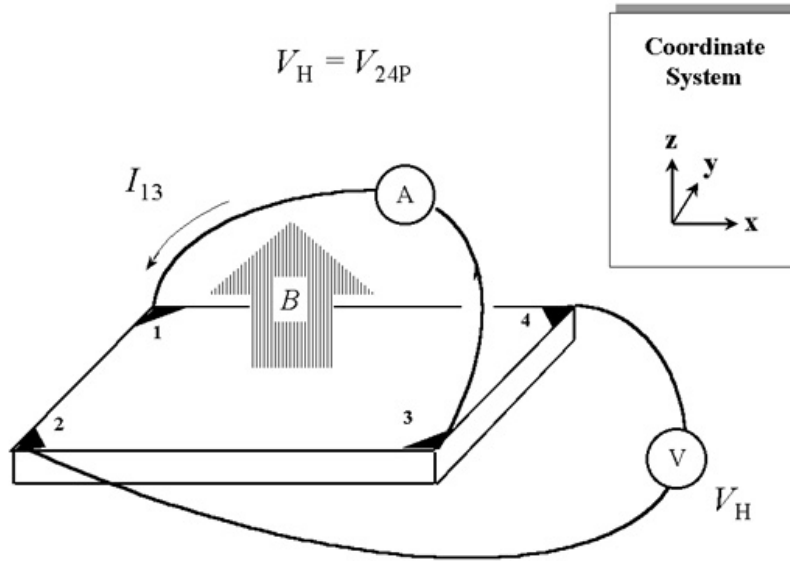


Figura 1.13. Configuración en la Técnica de Van Der Pauw para medidas de efecto Hall en materiales.

De la ecuación (45) se puede deducir la siguiente expresión para la densidad de portadores de carga n :

$$n = \frac{I \cdot B}{q \cdot d \cdot V_H} \quad (55)$$

Esta ecuación puede ser expresada en términos de la densidad superficial n_s , donde $n_s = nd$, luego se tiene que:

$$n_s = \frac{I \cdot B}{q \cdot V_H} \quad (56)$$

De modo que, solo basta con medir el voltaje Hall (V_H), y conocer los valores de carga (q), corriente (I) y campo magnético (B) aplicados para determinar el valor de la densidad superficial o de capa del material.

La movilidad de portadores Hall, μ_H , puede ser expresada en términos de la resistencia superficial, R_s , de la muestra, y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\mu_H = \frac{V_H}{R_S \cdot I \cdot B} = \frac{1}{q \cdot n_s \cdot R_S} \quad (57)$$

La resistencia superficial se determina mediante el uso de la Técnica de Van Der Pauw para medidas de resistividad. Mientras que con el conocimiento del espesor de la película de material, d , se puede determinar la densidad volumétrica de portadores, $n = n_s / d$, y la resistividad volumétrica, $\rho = R_S d$.

A continuación se verá cual debe ser la geometría preferida de la muestra a estudiar, como deben efectuarse las medidas y los cálculos de resistividad del material, aquí se verá que la resistencia superficial se encuentra relacionada con dos resistencias características mediante una ecuación trascendental la cual puede ser resuelta de forma numérica, también se darán las pautas para realizar las medidas y los cálculos de efecto Hall para la determinación de la densidad de portadores de carga y las diferentes formas que existen para realizar los contactos sobre la muestra de material analizado.

1.2.2.1 Geometría de la Muestra de Material

En la figura 1.14 se presentan los diferentes tipos de geometrías de materiales que se pueden usar para realizar medidas de resistividad y efecto Hall en la técnica de Van Der Pauw [26,27]. La geometría tipo *hoja de trébol* es la preferencial, este diseño tiene el error más bajo debido a su menor tamaño de contacto eficaz, pero es más difícil de fabricar que un cuadrado o rectángulo. Una geometría aceptable es la de tipo *cuadrado o rectángulo*, en esta los contactos deben realizarse en las esquinas de la muestra; no es recomendable hacer los contactos en los límites o dentro del perímetro, esto es, para obtener mejores resultados de las medidas.

También cabe anotar que es preferible utilizar placas delgadas de material lo más uniforme posible, o sea, con un valor de espesor constante. Las dimensiones laterales de la muestra de material deben ser grandes comparadas con el tamaño de los contactos y el espesor de la muestra [28]. Y finalmente, Los diámetros medios de los contactos, y el espesor de la muestra deben ser mucho menores que la distancia entre los contactos.

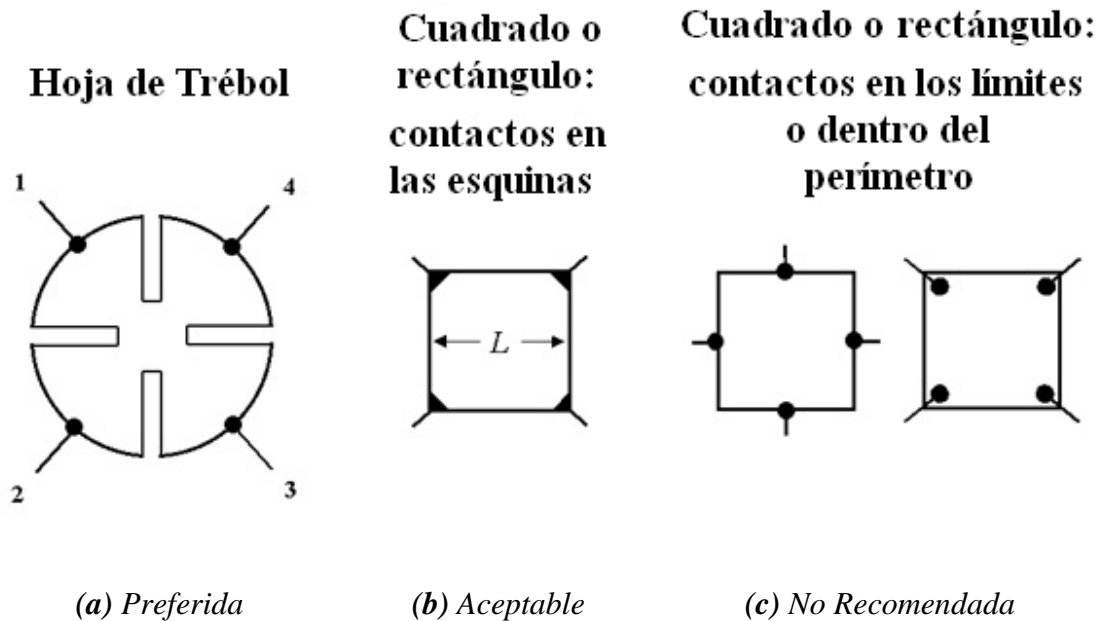


Figura 1.14. Geometrías de la muestra para medidas de resistividad y efecto Hall en la Técnica de Van Der Pauw.

1.2.2.2 Medidas y Cálculos de Resistividad

Para realizar las medidas de resistividad se conectan cuatro cables, los cuales deben consistir del mismo material, a los cuatro contactos óhmicos de la muestra antes mencionados. Estos contactos se nombrarán como 1, 2, 3, y 4; los cuales van en sentido contrario a las manecillas del reloj como se ilustra en la figura 1.15; y como se verá más adelante, esta configuración permitirá determinar dos resistencias características de la muestra. Es importante tener en cuenta que se debe usar la misma cantidad de alambre para los cuatro cables, esto se hace para minimizar los efectos termoeléctricos.

Se definirá a la resistividad de la muestra o película analizada como ρ y estará dada en ohmio por centímetro ($\Omega \cdot \text{cm}$), y al espesor de la película conductora como d y estará dada en centímetros (cm). Se llamará I_{12} a la corriente positiva inyectada en el contacto 1 y sacada por el contacto 2, la cual vendrá dada en amperios (A); de igual manera se definirán

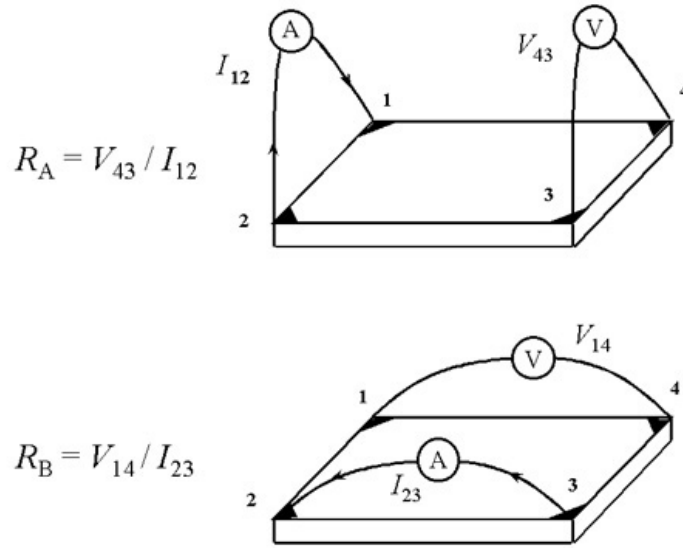


Figura 1.15. Configuración en Van Der Pauw usada en la determinación de las dos resistencias características R_A y R_B .

las corrientes I_{23} , I_{34} , I_{41} , I_{21} , I_{14} , I_{43} , I_{32} . Similarmente, se denominará a V_{12} como el voltaje medido entre los contactos 1 y 2 ($V_1 - V_2$) en ausencia de campo magnético ($B = 0$), el cual vendrá dado en voltios (V); de igual forma se definirán los voltajes V_{23} , V_{34} , V_{41} , V_{21} , V_{14} , V_{43} , V_{32} .

Para realizar las medidas de resistividad se debe emplear una corriente DC, tal que cuando se aplique a la muestra la potencia disipada no exceda 5 mW (preferiblemente 1 mW). Este límite puede ser especificado antes de comenzar secuencia de medición automática midiendo la resistencia R entre cualquier par de contactos opuestos, 1 a 3 o 2 a 4, y teniendo en cuenta que:

$$I < (200R)^{-1/2} \quad (58)$$

Luego, se aplica la corriente I_{21} y se mide el voltaje V_{34} , se invierte la polaridad de dicha corriente, ósea que se tiene I_{12} , y se mide V_{43} . Este proceso se repite para obtener los seis valores de voltaje restantes (V_{41} , V_{14} , V_{12} , V_{21} , V_{23} , V_{32}).

A partir de estos ocho valores de voltaje se obtienen los siguientes ocho valores de resistencia (todos deben ser positivos):

$$\begin{aligned}
 R_{21,34} &= V_{34} / I_{21} & ; & & R_{12,43} &= V_{43} / I_{12} \\
 R_{32,41} &= V_{41} / I_{32} & ; & & R_{23,14} &= V_{14} / I_{23} \\
 R_{43,12} &= V_{12} / I_{43} & ; & & R_{34,21} &= V_{21} / I_{34} \\
 R_{14,23} &= V_{23} / I_{14} & ; & & R_{41,32} &= V_{32} / I_{41}
 \end{aligned} \tag{59}$$

Lo siguiente es verificar la consistencia de las medidas, para esto es necesario que el voltímetro utilizado este bien calibrado, el anterior arreglo está hecho para que todos los valores de voltaje medidos sean positivos; también es necesario que la muestra sea uniforme y que la calidad de los contactos óhmicos sea buena. La consistencia o repetibilidad de las medidas se verifica con las siguientes igualdades:

$$\begin{aligned}
 R_{21,34} &= R_{12,43} & ; & & R_{43,12} &= R_{34,21} \\
 R_{32,41} &= R_{23,14} & ; & & R_{14,23} &= R_{41,32}
 \end{aligned} \tag{60}$$

También requiere que se cumpla con el teorema de reciprocidad:

$$\begin{aligned}
 R_{21,34} + R_{12,43} &= R_{43,12} + R_{34,21} \\
 R_{32,41} + R_{23,14} &= R_{14,23} + R_{41,32}
 \end{aligned} \tag{61}$$

Las anteriores igualdades deben cumplirse en un 5% o menos, en caso contrario se deben estudiar todas las posibles causas de error.

De las resistencias halladas en (59) se pueden determinar dos valores característicos de resistencia, que se llamarán R_A y R_B , estas resistencias están dadas por:

$$\begin{aligned}
 R_A &= \frac{R_{21,34} + R_{12,43} + R_{43,12} + R_{34,21}}{4} \\
 R_B &= \frac{R_{32,41} + R_{23,14} + R_{14,23} + R_{41,32}}{4}
 \end{aligned} \tag{62}$$

La resistencia superficial (R_S) puede determinarse de estas dos resistencias características

por medio de una ecuación trascendental denominada ecuación de Van Der Pauw, dicha ecuación está dada por:

$$\exp\left(-\frac{\pi \cdot R_A}{R_s}\right) + \exp\left(-\frac{\pi \cdot R_B}{R_s}\right) = 1 \quad (63)$$

Con el conocimiento de la resistencia superficial y el espesor de la muestra se puede calcular la densidad volumétrica de carga del material. Para resolver la ecuación de Van Der Pauw es necesario emplear un método numérico por iteración, a continuación se darán las pautas para resolver esta ecuación:

- 1) Se establece el error límite $\delta = 0.0005$, que corresponde al 0.05 %.
- 2) Se calcula el valor inicial de z_i , o $z_0 = 2 \ln(2) / [\pi(RA + RB)]$.
- 3) Se calcula la i -ésima iteración de $y_i = 1/\exp(\pi z_{i-1} RA) + 1/\exp(\pi z_{i-1} RB)$.
- 4) Se calcula la i -ésima iteración de z_i , donde:

$$z_i = z_{i-1} - [(1 - y_i)/\pi] / [RA/\exp(\pi z_{i-1} RA) + RB/\exp(\pi z_{i-1} RB)]$$
- 5) Cuando $(z_i - z_{i-1})/z_i$ es menor que δ , se detiene la iteración y se calcula la resistencia de superficie $RS = 1/z_i$.
- 6) La resistividad ρ del material es dada por $\rho = RSd$, donde d es el espesor de la capa conductora.

1.2.2.3 Medidas y Cálculos de Efecto Hall

El voltaje Hall para muestras de material conductor es, en general, bastante pequeño (del orden de los microvoltios) esto lo hace difícil de medir; pero esta no es la única dificultad para hacer medidas Hall, dado que en la actualidad se cuenta con nanovoltímetros capaces de medir este voltaje tan pequeño; el problema más relevante viene del gran voltaje offset causado por la colocación de contactos no simétricos, la forma de la muestra, y en ocasiones la no uniformidad de la temperatura.

Las medidas de efecto Hall permiten determinar la densidad superficial de portadores de carga n_s , y también, con el espesor de la muestra conocido, hallar la densidad volumétrica de portadores, ya sea n (electrones, material tipo n) o p (huecos, material tipo p).

Para resolver la mayoría de los problemas en medidas Hall mencionados, se realizan dos tipos de medidas, uno para el campo magnético aplicado en dirección positiva y otro para el campo aplicado en dirección negativa. Antes de entrar en detalles, se darán algunas definiciones.

Se llamará a I_{13} la corriente DC inyectada en el contacto 1 y sacada por el contacto 3, de igual manera se definirán las corrientes I_{31} , I_{42} , I_{24} . Se denominará a B como el campo magnético aplicado de forma constante y uniforme a lo largo (paralelo) del eje Z , ver figura 1.13; este campo será positivo si apunta en la dirección Z positiva, y será negativo cuando apunte en la dirección Z negativa. Se llamará a V_{24P} el voltaje Hall medido entre los contactos 2 y 4 con el campo magnético positivo para la corriente I_{13} , de igual forma se definirán los voltajes V_{42P} , V_{13P} , y V_{31P} . De manera similar se definen los voltajes V_{24N} , V_{42N} , V_{13N} , y V_{31N} para el campo magnético aplicado en dirección negativa.

Para realizar las medidas Hall sobre el material de estudio, primero se aplica un campo magnético positivo B , luego se aplica una corriente I_{13} a los contactos 1 y 3 y se mide V_{24P} , a continuación se aplica una corriente I_{31} a los contactos 3 y 1 y se mide V_{42P} ; igualmente se miden los voltajes V_{13P} y V_{31P} con I_{42} e I_{24} , respectivamente. Finalmente se invierte la dirección del campo magnético (B negativo), y similarmente, se miden los voltajes V_{24N} , V_{42N} , V_{13N} , y V_{31N} con I_{13} , I_{31} , I_{42} , e I_{24} , respectivamente.

Estas ocho medidas de voltajes Hall anteriores V_{24P} , V_{42P} , V_{13P} , V_{31P} , V_{24N} , V_{42N} , V_{13N} , y V_{31N} permiten determinar el tipo de muestra analizada, ya sea n o p , y la densidad superficial de portadores n_s . La movilidad Hall puede determinarse a partir de la densidad superficial de portadores y la resistencia superficial R_s obtenida en la medida de la resistividad, ver la ecuación (57).

Sobra decir que para una muestra de material conductor uniforme, el promedio del voltaje Hall de cada uno de los dos juegos diagonales de contactos debe ser el mismo.

Para calcular la densidad de portadores y la movilidad Hall, primero se hacen los cálculos siguientes, estos cálculos deben realizarse manteniendo los signos de los voltajes medidos para corregir el voltaje offset:

$$\begin{aligned} V_C &= V_{24P} - V_{24N} & ; & & V_D &= V_{42P} - V_{42N} \\ V_E &= V_{13P} - V_{13N} & ; & & V_F &= V_{31P} - V_{31N} \end{aligned} \quad (64)$$

Luego se determina el tipo de muestra estudiada a partir del signo del resultado de la suma de voltajes $V_C + V_D + V_E + V_F$. Si esta suma es positiva, la muestra es de tipo-p, y si la suma es negativa el material es tipo-n.

La densidad superficial de portadores p_S (en portadores/cm²) se determina mediante la siguiente ecuación, si la suma de los voltajes mencionados es positiva:

$$p_S = \frac{(8 \times 10^{-8})IB}{q(V_C + V_D + V_E + V_F)} \quad (65)$$

En el caso de que la suma de los voltajes sea negativa, la expresión para la densidad superficial n_S es:

$$n_S = \left| \frac{(8 \times 10^{-8})IB}{q(V_C + V_D + V_E + V_F)} \right| \quad (66)$$

En donde el campo magnético B esta dado en gauss (G) y la corriente I está dada en amperios (A).

Con el conocimiento de la densidad superficial de portadores y el espesor d de la muestra conductora, puede hallarse la densidad volumétrica de portadores (en portadores/cm³) como sigue:

$$n = n_S / d \quad (67)$$

$$p = p_S / d$$

La movilidad Hall μ_H , en unidades de cm²/V·s, se calcula a partir de la densidad superficial de portadores (p_S o n_S) y la resistencia superficial, por medio de la ecuación (57).

Los pasos necesarios para la realización de medidas y cálculos Hall sobre muestras de material ya están completos; ahora queda solamente una recomendación de lo que podría contener la Hoja de cálculos Hall:

- La identificación de la muestra, como un número de barra, la geometría de la muestra, la temperatura de la muestra, el espesor, datos, y el operador.
- Los valores de corriente I aplicados a la muestra y de campo magnético B .
- El valor calculado de resistencia superficial R_S , y de resistividad ρ si el espesor d es conocido.
- El valor calculado de la densidad superficial de portadores n_S o p_S , y la densidad volumétrica de portadores n o p si d es conocido.
- El valor calculado de la movilidad Hall μ_H .

1.2.3 La Técnica AC

En la técnica o sistema de medidas de efecto Hall AC, la corriente directa (DC) suministrada a la muestra de material conductor se reemplaza por una corriente variante en el tiempo o alterna (AC), lo cual, en el momento de realizar mediciones de este fenómeno, genera un voltaje Hall variante en el tiempo [10,11]. Por lo anterior, la fuente DC utilizada debe cambiarse por un generador de señales o fuente de corriente AC; y el voltímetro debe ser reemplazado por un amplificador sensible a fase o Lock-in. Estos dos equipos (el Generador y el Lock-in) pueden trabajar en sincronización para realizar medidas de tipo AC en un amplio rango de frecuencia. El amplificador sensible a fase sería utilizado para medir el voltaje Hall AC generado en la muestra cuando se le hace pasar una corriente alterna en dirección perpendicular a este voltaje y en presencia de campo magnético (perpendicular a la corriente aplicada). Señal o voltaje medido, tendrá la característica de ser una señal de la misma frecuencia de la corriente AC aplicada pero con una fase distinta. El Lock-in arrojará dos tipos de medidas, un voltaje en fase (o parte real) y otro en desfase

(o parte imaginaria) con señal de excitación (o corriente suministrada); la señal en fase se encuentra relacionada con el efecto Hall DC (discutido en secciones anteriores) y la otra con procesos disipativos que se presentan en el material (reactancia de la muestra).

1.3 Fuentes de error en medidas Hall

Existen muchos tipos de errores que se pueden presentar en el momento de desarrollar el sistema o técnica y realizar las medidas de efecto Hall, estos diferentes tipos de errores se deben a contactos mal diseñados, efectos termomagnéticos, una muestra no uniforme, mala realización de medidas eléctricas y térmicas, entre otros [29,30]. A continuación se discutirá algunas de estas fuentes de error.

1.3.1 Contactos para corriente y medición

El voltaje transversal en la muestra se debe al efecto Hall y a las corrientes transversales presentes. Estas corrientes transversales son provocadas por el corto circuito en los contactos de corriente, y su influencia depende fuertemente de la razón largo a ancho de las muestras. Para razones largo a ancho de 5.5 o mayores, no se produce error de importancia. Cualquier variación en el espesor de los contactos de medición puede producir una distorsión en la distribución de las líneas de corriente en la muestra, lo cual conlleva a un error sistemático en la determinación del coeficiente Hall. Si los contactos presentan igual espesor que la muestra, el disturbio de la corriente no produce este error sistemático.

1.3.2 Homogeneidad del campo magnético

Para evitar errores de medida el campo magnético aplicado sobre la muestra debe ser constante y uniforme, dentro de un 3%, y debe ser ortogonal o perpendicular a la corriente aplicada a la muestra (perpendicular al plano de la lámina) ver figura 1.14, dentro de unos pocos grados.

1.3.3 Efectos termomagnéticos

La existencia de varias fuentes de diferencia de potencial debidas a efectos termomagnéticos es muy conocida; estos deben eliminarse o minimizarse, puesto que algunos de ellos pueden alcanzar magnitudes similares a las del voltaje de Hall mismo. Estos efectos consisten en la aparición de voltajes adicionales debido a un gradiente de temperatura que se presenta en el material al someter una corriente a un campo magnético perpendicular a ella; entre estos efectos están el de Ettingshausen, el efecto Nernst, y el de Righi-Leduc [30,31]. Para minimizar estos fenómenos se recomienda emplear contactos del mismo material, y emplear el método de inversiones de corriente y de campo magnético para eliminar cualquier diferencia de potencial medible que aún estuviese presente.

1.3.4 Efectos fotoeléctricos

Los efectos fotoconductivos y fotovoltaicos se presentan debido al calentamiento de la muestra de material por incidencia de radiación externa sobre ella. Estos efectos se pueden minimizar realizando medidas en un ambiente oscuro, como por ejemplo, introduciendo la muestra dentro de una caja negra.

1.3.5 Dimensiones de la muestra

Las dimensiones de la muestra deben ser mucho mayores que el espesor de la misma y que el tamaño de los contactos de medida y suministro de corriente. También se requiere una muestra con alto grado de uniformidad y alta precisión en el momento de la determinación del espesor de la película de material [32].

1.3.6 Mediciones eléctricas y térmicas

Se requiere estabilidad y precisión en el suministro de corriente a la muestra y en las medidas de la intensidad del campo magnético, la corriente eléctrica, el voltaje, y la temperatura de la muestra. En la medición de voltaje hay que tener en cuenta que este presenta fluctuaciones debido a variaciones térmicas, lo que produce errores de medida.

Cabe anotar que para un sistema que cuente con variación de temperatura, esta variación debe hacerse de tal forma que se mantenga una estabilidad térmica en el material para cada medida efectuada.

1.4 Tipos de contactos sobre la muestra

En el momento de realizar medidas experimentales de efecto Hall sobre materiales, los contactos podrían ser una de las principales causas de error, por eso se debe tener mucho cuidado al elegir el tipo de contacto, pues esto podría producir resultados erróneos o con mucho ruido. La elección del contacto depende en gran parte del tipo de material que se va a estudiar (algunas muestras se dañan a altas temperaturas) y de los parámetros de trabajo (corriente, temperatura). A continuación se explicaran algunos tipos de formas para realizar estos contactos, entre ellos se encuentran los contactos por soldadura, por pintura conductora y por presión [33].

1.4.1 Soldadura por fusión

En la soldadura de materiales, la técnica que consiste en calentar dos piezas de material conductor hasta que se derriten y se funden entre sí se le llama *soldadura por fusión*. Esta soldadura puede ser con aporte de material. Dentro de esta técnica están la soldadura TIG, la MIG, por puntos, entre otras [34,35]. A continuación se mencionaran algunas.

1.4.1.1 Soldadura TIG

El método denominado TIG es conocido en inglés como *GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)*, este procedimiento utiliza como fuente de calor un arco eléctrico que salta entre un electrodo de tungsteno y la pieza a soldar mientras una atmósfera protectora de gas inerte (argón o de helio) protege al baño de fusión. La alta densidad de corriente eléctrica producida por este proceso hace posible soldar a mayores velocidades que con otros métodos. El resultado final es excepcional con este método, pero la calidad de la soldadura depende del control de diferentes parámetros y ajuste del equipo, ver figura 1.16 (a).

1.4.1.2 Soldadura MIG

Este método es conocido en inglés como *Gas Metal Arc Welding (GMAW)*, en este proceso se establece un arco eléctrico entre un electrodo de hilo continuo que se renueva a medida que este se consume y la pieza a soldar, el electrodo es protegido por medio de una atmósfera protectora de mezclas de argón o de gases con base de helio. Los parámetros a controlar en este proceso son la intensidad de corriente, el diámetro del alambre electrodo, la velocidad de movimiento y el ángulo de la pistola de soldar, ver figura 1.16 (b).

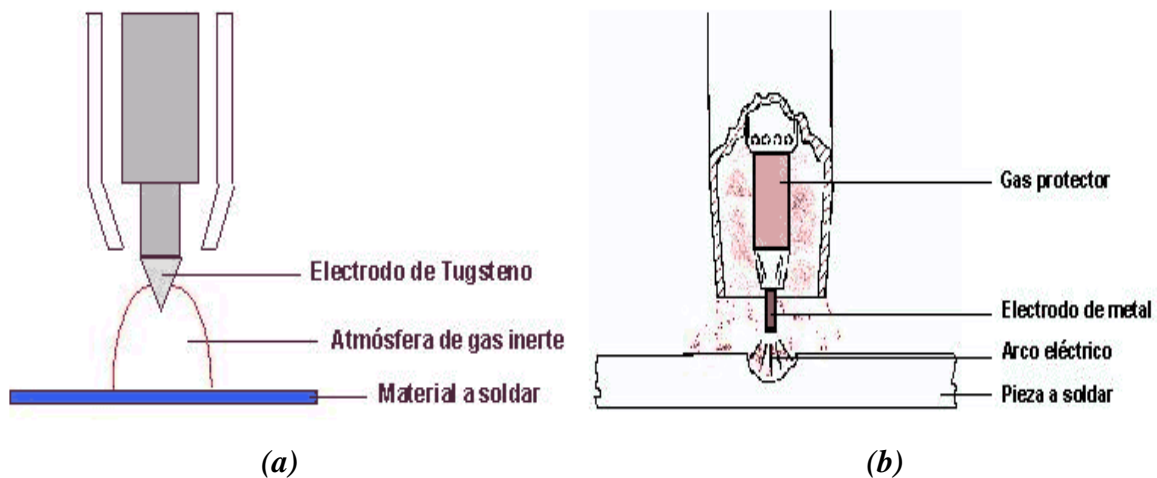


Figura 1.16. Esquema de las soldaduras por fusión: (a) TIG, y (b) MIG.

1.4.1.3 Soldadura por puntos

La soldadura por puntos es un método de soldadura por resistencia, útil en láminas metálicas, esta consiste en hacer pasar una corriente eléctrica de gran intensidad a través de los materiales que se van a unir. Como en la unión de los mismos la resistencia es mayor que en el resto de sus cuerpos, se generará el aumento de temperatura en la juntura (efecto Joule). Aprovechando esta energía y con un poco de presión se logra la unión. La alimentación eléctrica pasa por un transformador en el que se reduce la tensión y se eleva considerablemente la intensidad para aumentar la temperatura.

1.4.2 Soldadura eléctrica

Este tipo de soldadura consiste en unir dos fragmentos de material (frecuentemente cobre, hierro o latón) por medio de un metal de aportación de bajo punto de fusión (por debajo de los 450 °C) y por debajo del punto de fusión de los materiales a soldar, normalmente se usa una aleación eutéctica compuesta en su mayoría de estaño y plomo. El estaño blanco proporciona buena continuidad eléctrica y es el material de aportación más usado, aunque en ciertos componentes se usan aleaciones con plata u oro.

1.4.3 Contacto por Pintura conductora

Una forma de contactar la muestra es mediante pintura conductora, la manera de aplicarla es muy sencilla, solo basta con colocar una pequeña cantidad de esta pintura en el punto donde se requiere unir los dos materiales y luego dejar secar (como si fuese pegamento). Estas pinturas están compuestas, en general, por disolvente y algún tipo de polvo metálico, siendo la más común la pintura de plata. La ventaja de este tipo de contacto, a diferencia de los anteriores, es que no requiere de altas temperaturas para realizarlo; pero en este caso los contactos no son tan rígidos como en los hechos por soldadura.

1.4.4 Contacto por presión

Existen varias formas de contactar materiales por presión. Una manera es colocar hilos sobre la muestra y presionar estos de la forma más conveniente, por ejemplo entre dos placas no conductoras. Otra forma es mediante puntas elásticas, esta es una de las más utilizadas, y consiste en la utilización de unas puntas que cuentan con un resorte o muelle que hace la función de amortiguamiento y ajuste, o contacto entre la punta y la muestra, en este caso la presión de cada contacto es independiente. Una de las desventajas de los contactos por presión es que a bajas temperaturas pueden generar resistencias de contacto muy altas.

1.5 Aplicaciones del efecto Hall

El efecto Hall además de ser utilizado para conocer las propiedades de transporte eléctrico de materiales conductores como la densidad y la movilidad de portadores de carga; también (con el surgimiento de la electrónica moderna) se han desarrollado sensores de efecto Hall, los cuales permiten realizar mediciones de campos magnéticos; de intensidad de corrientes eléctricas; también se han elaborado sensores o detectores de posición sin contacto, utilizados particularmente en el automóvil, para detectar la posición de un árbol giratorio (caja de cambios, paliers, etc.); se encuentran también sensores de efecto Hall bajo las teclas de los teclados de los instrumentos de música modernos (órganos, órganos digitales, sintetizadores) evitando así el desgaste que sufren los contactos eléctricos tradicionales; se encuentran sensores de efecto Hall en el codificador de un motor de CD; los motores de Efecto Hall (HET) son aceleradores de plasma de gran eficacia; entre otros [36-39]. A continuación se verán algunas de las aplicaciones más importantes del efecto Hall.

1.5.1 Sensores de Efecto Hall

El sensor de efecto Hall o simplemente sensor Hall o sonda Hall (denominado según Edwin Herbert Hall) se sirve del efecto Hall para la medición de campos magnéticos, corrientes, o para la determinación de la posición. Los sensores Hall se producen a partir de finas placas de semiconductores u otros materiales conductores, ya que en ella el espesor de los portadores de carga es reducido y por ello la velocidad de los electrones es elevada, para conseguir un alto voltaje de Hall. Los elementos de los sensores Hall se integran mayoritariamente en un circuito integrado en los que se produce una elevación de señal y una compensación de la temperatura [39].

1.5.1.1 Medición de campo magnético

Si fluye corriente por un sensor Hall y se aproxima a un campo magnético que fluye en dirección vertical al sensor, entonces el sensor crea un voltaje saliente proporcional al producto de la fuerza del campo magnético y de la corriente. Si se conoce el valor de la corriente, entonces se puede calcular la fuerza del campo magnético (o la densidad de flujo magnético); si se crea el campo magnético por medio de corriente que circula por una

bobina o un conductor, entonces se puede medir el valor de la corriente en el conductor o bobina.

Muchas aplicaciones prácticas relacionadas con la medición de campos magnéticos constantes y variables han surgido a partir de los sensores integrados de efecto Hall, los cuales se incorporan en una carcasa para tomar el nombre de sondas Hall. Estas sondas tienen muchos campos de aplicación yendo de la geofísica a la ignición y sistemas de frenado en automóviles. Estas sondas Hall de campo magnético incluyen una fuente de corriente constante y un amplificador para producir un voltaje de salida que se relaciona linealmente a la fuerza del campo; y normalmente contienen dos sensores Hall montados mutuamente perpendiculares, uno para medir campo axial y otro para medir campo radial, ver figura 1.17.

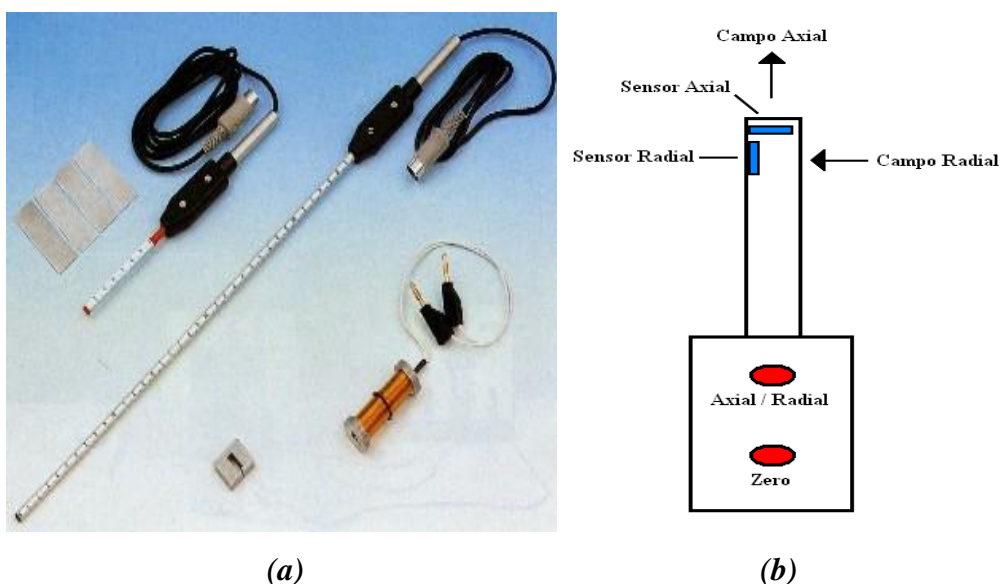


Figura 1.17. Sensor Hall para medir campo magnético: (a) Sonda Hall, (b) Configuración de una Sonda Hall.

1.5.1.2 Sensores de corriente

Los sensores de corriente Hall se usan como bobinas, recorridas con una corriente por medir situadas en separación del núcleo de hierro [40]. Estos sensores de corriente se comercializan como componentes íntegros, son muy rápidos, se pueden usar para la

medición de corrientes continuas (a diferencia de los transformadores de corriente) y proveen una separación de potencial entre circuitos de rendimiento y la electrónica de control. Existen dos tipos principales de sensores, de anillo abierto (open-loop) y de anillo cerrado (closed-loop); el segundo ofrece mejor precisión y rangos dinámicos más amplios pero a un costo mayor, ver figura 1.18. El sensor de Efecto Hall tiene una excelente respuesta a la frecuencia y está capacitado para medir corrientes muy altas.

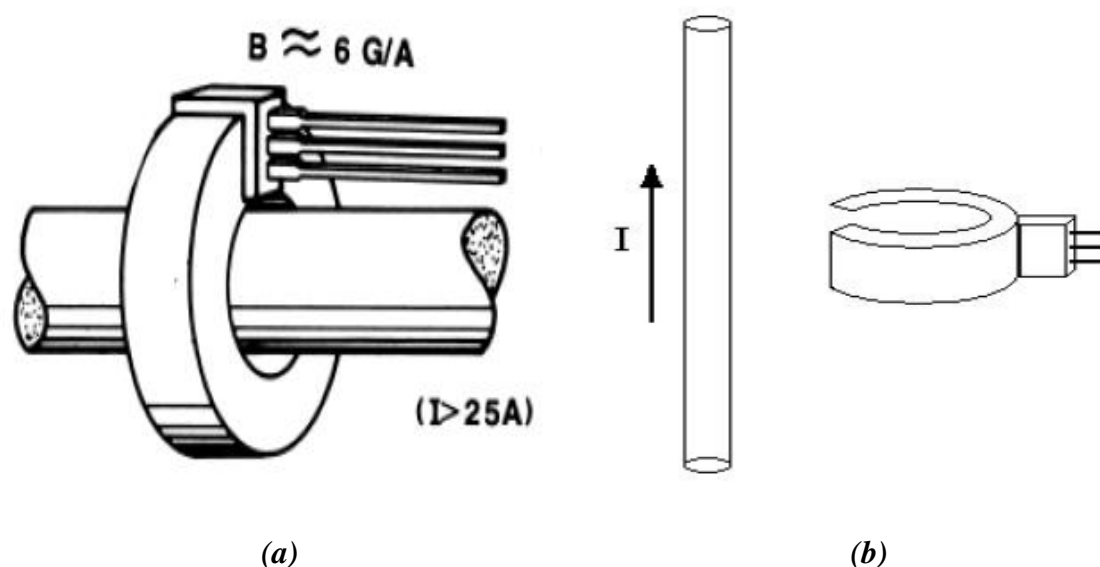


Figura 1.18. Esquemas de sensores Hall para medición de corriente: (a) Sensor de anillo cerrado, (b) Sensor de anillo abierto.

1.5.1.3 Sensores de posición

Como sensor de posición o detector para componentes magnéticos los sensores Hall son especialmente ventajosos si la variación del campo magnético es comparativamente lenta o nula. En estos casos el inductor usado como sensor no provee un voltaje de inducción relevante. En la industria del automóvil el sensor Hall se utiliza de forma frecuente, ej. en sensores de posición del cigueñal (CKP) en el cierre del cinturón de seguridad, en sistemas de cierres de puertas, para el reconocimiento de posición del pedal o del asiento, el cambio de transmisión y para el reconocimiento del momento de arranque del motor. La gran ventaja es la invariabilidad frente a suciedad (no magnética) y agua.

1.5.1.4 Sensores de aceleración

Existen sensores de aceleración de efecto Hall para la medición de las aceleraciones longitudinal y transversal de vehículos [41]. Para su correcto funcionamiento y debido a su función en el sistema, es conveniente que este sensor esté instalado lo más cerca posible del centro de gravedad del vehículo. Su misión es la de detectar si existen fuerzas laterales que traten de sacar el vehículo de la trayectoria deseada y detectar su intensidad. Estos sensores están constituidos por un resorte fijado por uno de sus extremos, en el extremo libre opuesto está colocado un imán permanente en función de masa sísmica (que se mueve), sobre el imán permanente se encuentra el verdadero sensor de efecto Hall con la electrónica de evaluación, y debajo del imán hay colocada una placa de amortiguación. Debido a que el sensor está sujeto a una aceleración transversal al resorte, la posición de reposo del sistema masa-resorte cambia; luego su desplazamiento es un parámetro específico de la aceleración, ver figura 1.19.

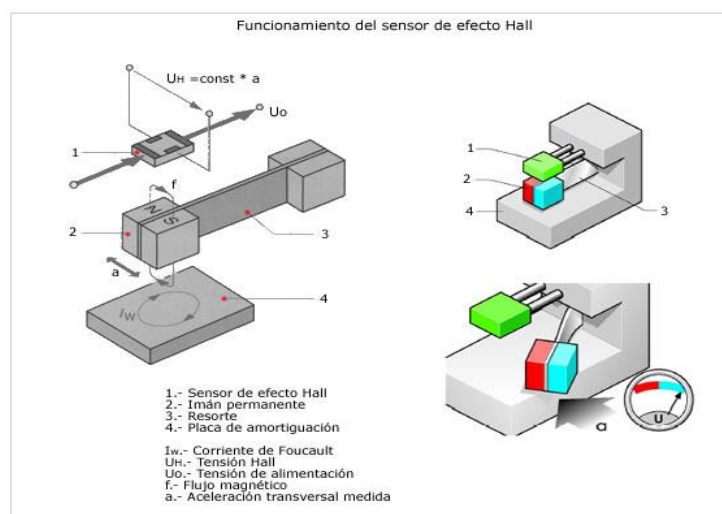


Figura 1.19. Sensor de aceleración de efecto Hall, 1) sensor de efecto Hall, 2) imán permanente, 3) resorte, 4) placa de amortiguación.

2. Sistema de Medidas de Efecto Hall DC y AC

En este capítulo se verá inicialmente los tipos de sistemas de medidas Hall más comunes, como los contruidos por empresas comerciales, los diseñados en laboratorios de universidades, o según el rango de resistencias que puedan medir. Luego se verá como fue diseñado el Sistema de Medidas de Efecto Hall DC y AC, aquí se mencionarán las características principales de los componentes o hardware constituyentes del sistema, entre los componentes están un nanovoltímetro, una fuente DC y AC y un electroimán capaz de generar un campo de hasta 800 mT. También se hablará del programa o software diseñado para el control de todos los equipos y la adquisición de los datos medidos por el sistema Hall. Este programa, diseñado en el entorno de LabView, se caracteriza por ser sencillo de manejar, por dar seguridad a los equipos, y porque puede ser modificado según se requiera. Finalmente se verán las diferentes características que deben tener el portamuestras y los contactos de muestra para realizar las medidas de efecto Hall, ya sea en materiales conductores o semiconductores, aquí se verá que es necesario aislar la muestra de la radiación externa para obtener mejores resultados en las medidas.

2.1 Clasificación de los sistemas de efecto Hall

Existen dos tipos de sistemas de medidas de efecto Hall, el primer tipo son los sistemas compactos o dedicados, contruidos por empresas como Lakeshore y Accent [42,43], la mayoría de estos equipos constan de dos partes, una para el suministro de corriente y medida de voltaje sobre la muestra estudiada, y otra para la generación del campo

magnético. El segundo tipo son los sistemas modulares, construidos en universidades y laboratorios [5,14], dichos sistemas constan de varios componentes, cada uno de ellos con la capacidad de realizar una función especializada como fuentes de corriente, medidores de voltaje, sensores y generadores de campo magnético, entre otros. Los sistemas modulares tienen varias ventajas sobre los dedicados, entre ellas se encuentran la posibilidad de ser modificados, pueden ser actualizados, son más económicos, y presentan mayores rangos de trabajo. En la figura 2.1 se muestra un ejemplo de diagrama de flujo de un sistema modular para hacer medidas Hall variando la corriente [44].

También se pueden clasificar estos sistemas según el rango de resistencias que puedan medir con precisión. Está el rango de Muy Alta Resistencia (10^1 a $10^{14} \Omega$), estos sistemas requieren de guidores de corriente que aseguren que toda la corriente vaya a través de la muestra de material analizada. Para realizar medidas Hall en un rango de Alta Resistencia (10^{-2} a $10^{12} \Omega$) se necesita una fuente de corriente de alta precisión y alta resistencia de salida. También está el rango de Baja Resistencia (10^{-6} a $10^8 \Omega$), para el cual es necesario contar con una fuente de corriente precisa y de alto nivel (hasta 20 A) y con un voltímetro muy sensible.

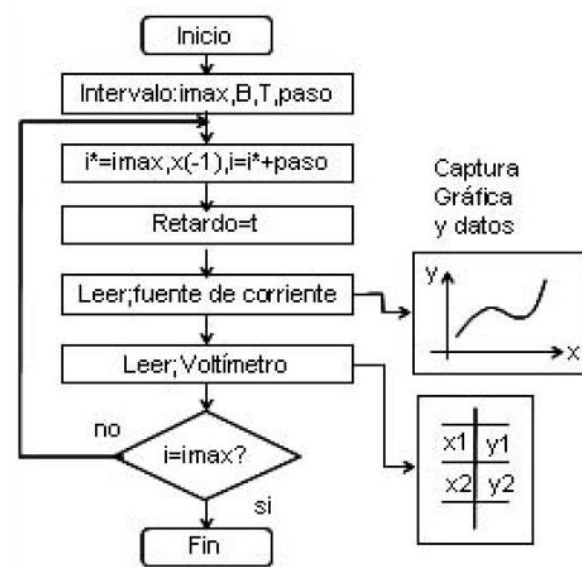


Figura 2.1. Diagrama de Flujo para realizar medidas de Voltaje Hall contra Corriente con Campo (B) y Temperatura (T) constantes.

2.2 Desarrollo experimental

2.2.1 Diseño y características del sistema

El sistema de tipo modular desarrollado para la medición del efecto Hall en el rango de Alta Resistencia (10^{-2} a $10^{12} \Omega$) tiene muchas características similares a los equipos comerciales elaborados especialmente para la medida de este efecto. A diferencia de otros sistemas comerciales cuyos costos son altos, además de que no pueden ser modificados ni mejorados, este sistema desarrollado tiene las características de ser un sistema relativamente económico, puede ser modificado para la obtención de otras variables físicas, y también puede ser actualizado y mejorado dependiendo de las necesidades del investigador.

El sistema de efecto Hall consta de un electroimán con la capacidad de generar un campo magnético de hasta 800 mT, una fuente de corriente para alimentar el electroimán, un gaussímetro acompañado de una sonda para la medida del campo magnético, una fuente de corriente DC y AC encargada de suministrar corriente de hasta 0.1 A a la muestra estudiada y un nanovoltímetro utilizado para la medición del voltaje Hall. Además de estos equipos también se tiene un conmutador para selección de dirección de corriente y medida de voltaje sobre la muestra requerido para la técnica de Van Der Pauw, un circuito para la inversión del campo magnético, y un computador con su respectivo software diseñado para controlar todo el sistema y obtener medidas de resistividad, así como de movilidad y densidad de portadores en función de la corriente, del campo magnético aplicado y de la frecuencia. Una imagen y un diagrama de bloques del Sistema de Efecto Hall son mostrados respectivamente en la figura 2.2 y figura 2.3.

2.2.2 Hardware del sistema

El computador utilizado para el control y registro de información se comunica con los equipos por vía GPIB-USB y por puerto paralelo. El conmutador y el circuito para



Figura 2.2. Imagen del Sistema de Efecto Hall DC y AC.

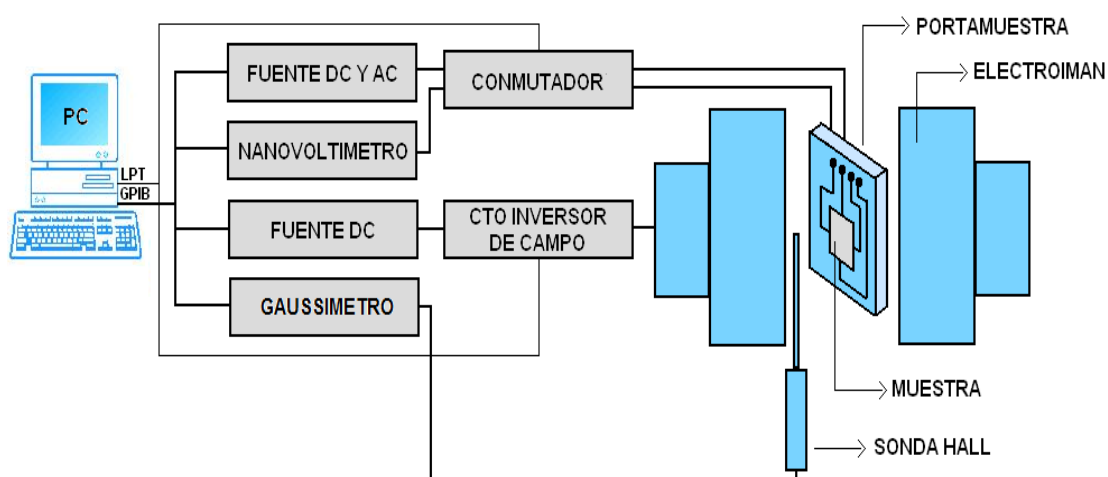


Figura 2.3. Diagrama de bloques del Sistema de Efecto Hall DC y AC.

inversión de campo requieren un control por puerto paralelo, mientras que el resto de los equipos se comunican con el computador vía GPIB-USB. La fuente de corriente utilizada para alimentar el electroimán produce hasta 18 A de corriente directa con un control de voltaje de 0 V a 120 V, el electroimán genera un campo magnético máximo de 800 mT con una corriente aplicada de 13.2 A. Para cambiar la dirección del campo magnético se cuenta con un circuito que consta de un relé controlado por el pin 1 (C0) del puerto paralelo, este circuito invierte la dirección de corriente sobre el electroimán y por tanto la del campo, ver figura 2.4.

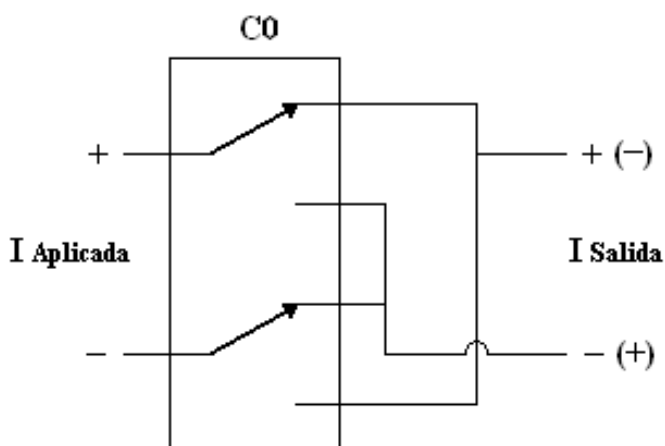


Figura 2.4. Esquema del Circuito Inversor de Campo Magnético.

La medición del campo magnético se realizó con la ayuda de un gaussímetro con su respectiva sonda Hall. El equipo utilizado para el suministro de corriente a la muestra estudiada es una fuente de corriente DC y AC, con rangos de corriente directa entre 0.1 pA y 0.1 A, también es una fuente de corriente alterna con amplitudes que van desde 0.1 pA hasta 0.1 A y frecuencias entre 1 mHz y 100 kHz. La medida del voltaje sobre la muestra es llevada a cabo por un nanovoltímetro con la capacidad de medir voltajes que van desde los 10^{-9} V hasta los 10^{+2} V, esta capacidad de medir voltajes tan bajos como

los nanovoltios lo hacen una excelente herramienta para la medida del voltaje Hall, ya que en general estos voltajes son bastantes pequeños. Para la conmutación de corriente aplicada y voltaje medido sobre la muestra se utiliza un conmutador de 12 relés, este permite hacer las inversiones necesarias para las medidas de resistividad y efecto Hall basado en la técnica de Van Der Pauw [22].

2.2.3 Software de control

El software seleccionado para el control del hardware y la toma de datos fue LabView (Laboratory Virtual Engineering Workbench) de la National Instruments. LabView permite recoger, analizar y monitorizar los datos dentro de un entorno de programación gráfico llamado lenguaje G en el que se ensamblan objetos llamados instrumentos virtuales (VI's) para formar el programa de aplicación con el que interactuará el usuario y que se denomina instrumento virtual. Además de lo que es la propia representación de los datos en los paneles interactivos como si se tratara de instrumentación real, permite múltiples opciones de manejo de datos, como su almacenamiento en disco y compartirlos en red o con otras aplicaciones. LabView además de permitir la comunicación mediante interfases comunes como el RS-232 o 485, también permite utilizar otros estándares más específicos de instrumentación como el IEEE-488 mas conocido como GPIB. El lenguaje gráfico de LabView hace de este programa muy esquemático y fácil de manejar; además cuenta con diversas librerías para la adquisición de datos (DAQ), análisis estadísticos y almacenamiento de información; y como se trabaja con subrutinas en módulos de bloques (SubVI's), se pueden utilizar otros SubVI's creados por otras personas usados como aplicaciones en otros VI's.

Los programas del sistema de efecto hall DC y AC desarrollados en el entorno LabView fueron diseñados para un sencillo manejo del usuario; un control de todas las variables necesarias para el manejo del sistema, entre las que se encuentran el número de medidas de voltaje por punto de corriente o campo aplicado, las cuales son promediadas por el

programa; también fueron diseñados para establecer unos límites de variables físicas de trabajo y así el usuario no puede ingresar valores superiores a los límites establecidos y causar daño a los equipos; para que todos los equipos de trabajo volvieran a un estado conocido cada vez que el programa termina o inicia, lo cual se hace utilizando unos SubVI's inicializadores; para una lectura de errores y sus posibles causas, ya sean debidas al hardware del sistema o al software de control; y finalmente para guardar y almacenar los datos generados por el sistema cada vez que se producen en formatos de texto, esto tiene la ventaja de que si por alguna razón el proceso no es llevado a su término, como debido a un corte de energía eléctrico o a una suspensión del programa por parte del usuario, el trabajo realizado hasta el momento no se perdería. Un ejemplo de los datos arrojados por el sistema y entregados en formato de texto es mostrado en la figura 2.5. En el Anexo A se presenta una explicación más a fondo de las variables involucradas, del manejo y del funcionamiento tanto del hardware como del software diseñado para el sistema de efecto Hall DC y AC.

2.2.4 Diseño y características del portamuestra

Para el diseño del portamuestras se tuvieron en cuenta los portamuestras desarrollados en el trabajo de “Diseño y Construcción de un Sistema de Medidas de Efecto Hall Basado en la Técnica de Van Der Pauw” [22], con algunas modificaciones e innovaciones. El diseño del portamuestras depende de tres características principales como las dimensiones de la muestra, la forma en que se va a contactar la muestra y la técnica utilizada para la medida del efecto Hall, como la técnica basada en el método de Vander Pauw o la técnica basada en el método de las Cuatro Puntas sin conmutación. En general se sugiere el uso de una muestra cuadrada o rectangular con lados entre 1 cm y 5 cm, y con un espesor lo bastante pequeño (del orden de los micrómetros).

Campo(mT)	Voltaje Hall(V)	Densidad(cm ⁻³)	Movilidad(cm ² /Vc)	Corriente(A)
-1.200000E+2	-6.205854E-7	1.812804E+20	9.111936E+1	1.000000E-2
-1.180000E+2	-6.216483E-7	1.769489E+20	9.334986E+1	1.000000E-2
-1.160000E+2	-9.490342E-7	1.527869E+20	1.081124E+2	1.000000E-2
-1.140000E+2	-8.705933E-7	1.636815E+20	1.009165E+2	1.000000E-2
-1.120000E+2	-7.744913E-7	1.807638E+20	9.137977E+1	1.000000E-2
-1.100000E+2	-8.218279E-7	1.673100E+20	9.872788E+1	1.000000E-2
-1.080000E+2	-8.080221E-7	1.670746E+20	9.886693E+1	1.000000E-2
-1.060000E+2	-8.508275E-7	1.557307E+20	1.060687E+2	1.000000E-2
-1.040000E+2	-6.743333E-7	1.927830E+20	8.568265E+1	1.000000E-2
-1.020000E+2	-7.076483E-7	1.801742E+20	9.167880E+1	1.000000E-2
-1.000000E+2	-6.922358E-7	1.805743E+20	9.147568E+1	1.000000E-2
-9.800000E+1	-7.316242E-7	1.674357E+20	9.865374E+1	1.000000E-2
-9.600000E+1	-6.488375E-7	1.849462E+20	8.931333E+1	1.000000E-2
-9.400000E+1	-7.535562E-7	1.559273E+20	1.059350E+2	1.000000E-2
-9.200000E+1	-6.248433E-7	1.840461E+20	8.975009E+1	1.000000E-2

Figura 2.5. Datos en Formato de Texto entregados por la técnica Hall de Van Der Pauw variando el campo y para una corriente constante.

Para contactar la muestra se tuvieron en cuenta tres tipos de contactos, el primer tipo de contacto es mediante pintura de plata que se deposita en un borde de la muestra y se contacta directamente con el portamuestras y si es necesario se fija la muestra al portamuestra con cinta adhesiva aislante. En la figura 2.6 se puede observar dos portamuestras de este tipo diseñados para una cinta magnética de 2 cm por 0.5 cm la cual se contacta en la mitad de cada lado y en las esquinas.

El segundo tipo de contacto es mediante el depósito de una cantidad pequeña de estaño (Sn) o Indio-estaño (InSn) sobre la muestra, la cual se une al portamuestra a través de alambres delgados de cobre, oro o plata. Este tipo de contacto produce una fuerza de unión más grande que la anterior, pero requiere que la muestra a estudiar soporte altas temperaturas de soldado. En la figura 2.7 se presenta un portamuestra de este tipo diseñado para una muestra semiconductor en el que se usaron alambres de cobre para contactar.

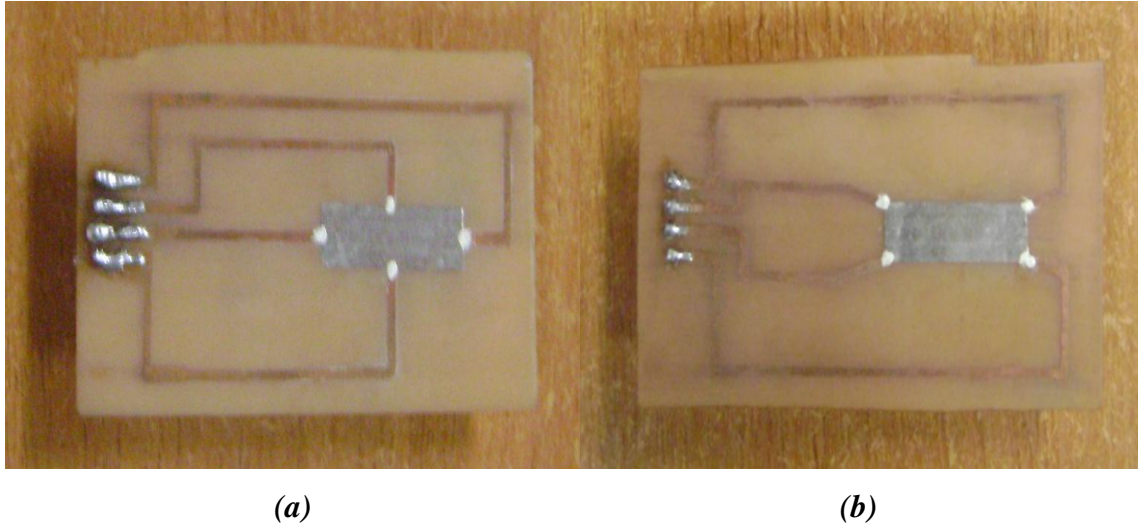


Figura 2.6. Portamuestras para un material magnético de 2×0.5 cm: (a) Muestra contactada en la mitad de sus lados, (b) Muestra contactada en las esquinas.

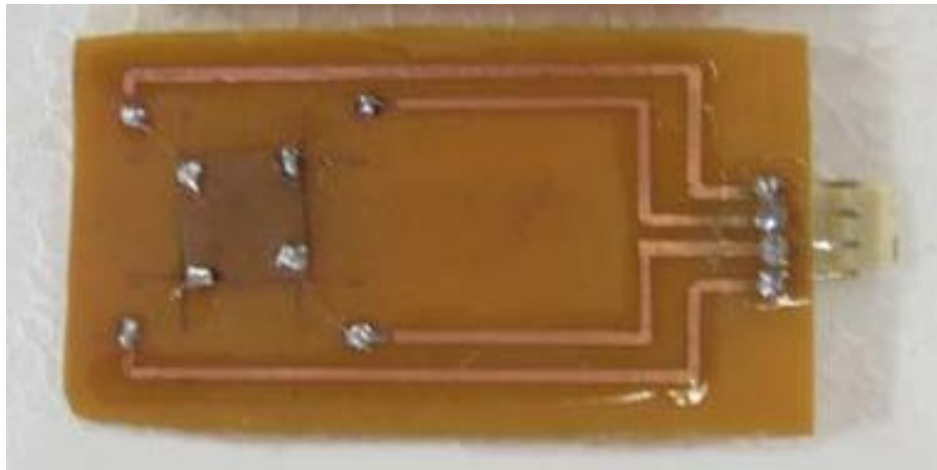


Figura 2.7. Portamuestra para un material semiconductor de hasta 2×2 cm.

El tercer tipo de contacto es por presión, la cual puede ser generada mediante cinta adhesiva que presione la muestra directamente con los caminos conductores del portamuestras, y para evitar que la muestra se pegue a la cinta se puede colocar entre

ambas un pedazo de acetato o de papel del tamaño de la muestra. Adicionalmente a esto se puede colocar un pedazo de cartón o de espuma (de 3 mm de espesor) entre la muestra y la tapa del portamuestras para obtener una mayor presión, y por lo tanto mejores contactos eléctricos.

Finalmente cabe anotar que el portamuestra junto con la muestra se introducen dentro de una caja negra para evitar el calentamiento de la muestra por radiación externa (efectos fotoeléctricos), ver figura 2.8.



Figura 2.8. Portamuestra introducido dentro de una caja negra para la realización de medidas en la oscuridad.

3. Resultados y discusión

La comprobación del funcionamiento del sistema de efecto Hall DC y AC se realizó a través de una serie de medidas efectuadas sobre unos circuitos impresos de resistencias contruidos para simular muestras de material, y sobre unas muestras de cobre. Se diseñaron dos circuitos de resistencias, el primero consta de varias resistencias de unos pocos Ohmios para simular el comportamiento de un material metálico, y el segundo consta de varias resistencias de unos cuantos Kilohmios, el cual simula una muestra de material semiconductor. El uso de estos circuitos de resistencias para la calibración del sistema tiene varias ventajas sobre la utilización de muestras de material, entre las que se encuentran una homogeneidad conocida y una soldadura de contacto más simple de realizar y más efectiva. También se realizaron algunas medidas sobre muestras de cobre, las cuales fueron obtenidas de circuitos impresos, y sobre cintas magnéticas blandas, el espesor de estas muestras necesario para los cálculos de la resistividad y la densidad de portadores de carga puede ser determinado a través del uso de micrómetros, técnicas de ultrasonido, o por microscopía electrónica de barrido (ESEM). A continuación se verán los resultados de las medidas de efecto Hall realizadas sobre los circuitos de resistencias y muestras mencionadas. Los resultados de estas medidas muestran los valores de resistividad, y gráficas de voltaje Hall, de densidad y movilidad de portadores en función de la corriente y del campo magnético de los materiales mencionados; finalmente se

mostrarán los resultados de medidas de efecto Hall AC en función del campo y de la frecuencia, y algunas medidas de magnetización DC y susceptibilidad AC de las cintas magnéticas analizadas; y como se verá, todos estos resultados muestran bajos porcentajes de error para dichas cintas, mientras que las medidas obtenidas para muestras de baja resistencia como el cobre presentan errores un poco más altos.

3.1 Caracterización eléctrica de Circuitos de Resistencias

Para calibrar el sistema de medidas de resistividad de la técnica de Van Der Pauw se construyeron dos circuitos impresos de resistencias genéricas con tolerancias de 5% en configuración tipo puente, ver figuras 3.1 y 3.2.

El primer circuito fue diseñado para simular un material conductor, y por lo tanto las resistencias utilizadas fueron de valores bajos como son 1 y 2 Ω , mientras que para simular una muestra de material semiconductor se hizo un circuito con resistencias de valores altos como 1 y 2 K Ω . Los diagramas de estos dos circuitos simuladores de muestras son mostrados en las figuras 3.2(b) y 3.2(c).

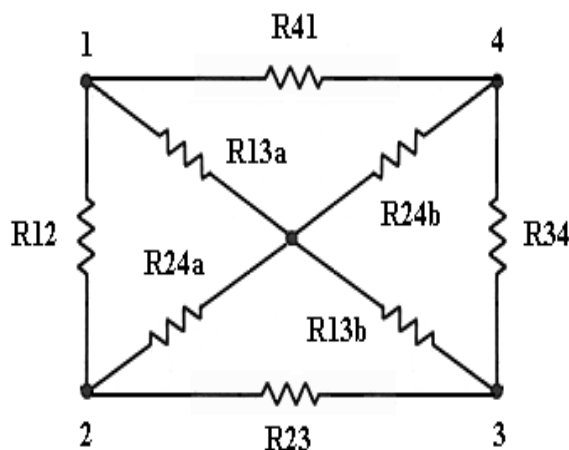
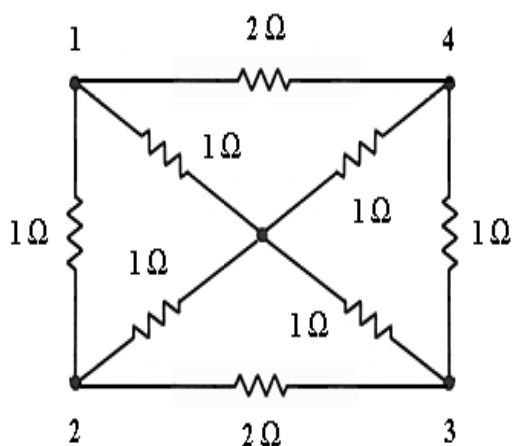


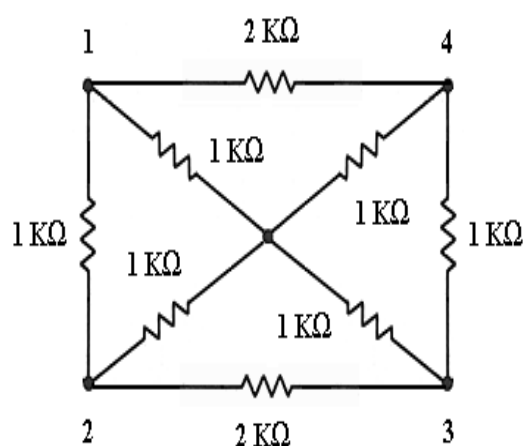
Figura 3.1. Circuito de Resistencias en Configuración tipo Puente.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.2. Diagrama de los circuitos simuladores de muestras: (a) Imagen de los Circuitos, (b) Circuito de Baja Resistencia, (c) Circuito de Alta Resistencia.

Debido a que los circuitos fueron construidos para simular muestras de material rectangular, la resistencias utilizadas entre los contactos 4-1 y 2-3 fueron mayores que las de los contactos 1-2 y 3-4 (largo y ancho de la muestra respectivamente), y la suma

de las resistencias usadas en los contactos diagonales 1-3 y 2-4 deben ser mayores a las resistencias puestas entre los contactos 1-2 y 3-4 (ancho de la muestra). A diferencia del uso de muestras de material, los contactos sobre estos circuitos simuladores de muestras fueron simples de realizar y por lo tanto se obtuvieron contactos de más alta calidad, además también se puede asegurar un grado de homogeneidad bastante alto. Los resultados de las pruebas sobre estos circuitos arrojados por el sistema se obtuvieron considerando un valor de espesor de 100 μm y fueron comparados con los mostrados en la bibliografía para materiales con los mismos órdenes de resistencia.

3.1.1 Medidas sobre el Circuito de Baja Resistencia

Los resultados de resistencia superficial (R_s), en Ohmios (Ω), y de resistividad (ρ), en Ohmios por centímetro ($\Omega\cdot\text{cm}$), para el circuito simulador de muestra conductora son mostrados en la tabla 3.1. Estos resultados son entregados por el sistema a partir de las ecuaciones (62) y (63).

No	R_s (Ω)	ρ ($\Omega\cdot\text{cm}$)
1	0.714832	7.14832E-3
2	0.705169	7.05169E-3
3	0.702773	7.02773E-3
4	0.701836	7.01836E-3
5	0.701103	7.01103E-3
6	0.700798	7.00798E-3
7	0.700472	7.00472E-3
8	0.700272	7.00272E-3
9	0.700153	7.00153E-3
10	0.700099	7.00099E-3
Promedio	0.702751	7.02751E-3
Desviación	± 0.004525	$\pm 0.04525\text{E-}3$

Tabla 3.1. Resultados de Resistencia Superficial y de Resistividad para el Circuito de Baja Resistencia.

El valor de resistencia superficial obtenido de $0.703 \pm 0.004 \, \Omega$ se encuentra en concordancia con los valores bajos de resistencia de $1 \, \Omega$ y $2 \, \Omega$ usados en el circuito. La resistividad obtenida de $(7,03 \pm 0.04) \times 10^{-3} \, \Omega \cdot \text{cm}$ es semejante a la resistividad del carbono ($3,5 \times 10^{-3} \, \Omega \cdot \text{cm}$) [18]. Este resultado de resistividad ubica a este circuito dentro del rango conductor, y el hecho de que sea mayor a la que presentan los metales puede deberse a que en este puente de baja resistencia la libertad de movimiento de los portadores es menor que la de los metales y esto está fuertemente relacionado con los materiales constituyentes de las resistencias usadas.

3.1.2 Medidas sobre el Circuito de Alta Resistencia

En la tabla 3.2 se muestran los resultados de resistencia superficial y de resistividad para el circuito simulador de muestra semiconductor.

No	$R_s (\Omega)$	$\rho (\Omega \cdot \text{cm})$
1	675.949	6.75949
2	676.171	6.76171
3	676.248	6.76248
4	676.248	6.76248
5	676.255	6.76255
6	676.254	6.76254
7	676.268	6.76268
8	676.267	6.76267
9	676.262	6.76262
10	676.254	6.76254
Promedio	676.218	6.76218
Desviación	± 0.098	± 0.00098

Tabla 3.2. Resultados de Resistencia Superficial y de Resistividad para el Circuito de Alta Resistencia.

La resistencia superficial obtenida de $676.2 \pm 0.1 \, \Omega$ se encuentra dentro del orden de magnitud de las resistencias utilizadas en el circuito, las cuales fueron de $1 \, \text{K}\Omega$ y $2 \, \text{K}\Omega$. El valor de resistividad obtenido de $6.762 \pm 0.001 \, \Omega \cdot \text{cm}$ coloca a este circuito en el dominio semiconductor, el cual comienza desde unos pocos $\Omega \cdot \text{cm}$, como es el caso del Germanio ($60 \, \Omega \cdot \text{cm}$), hasta resistividades del orden de $10^{10} \, \Omega \cdot \text{cm}$ en donde comienzan los aislantes como la madera [45,46].

Como era de esperarse, los valores de resistividad medidos para el circuito de alta resistencia ($10^0 \, \Omega \cdot \text{cm}$) son mucho mayores que los obtenidos para el circuito de baja resistencia ($10^{-3} \, \Omega \cdot \text{cm}$).

3.2 Caracterización eléctrica de Muestras de Cobre

Después de realizar las pruebas sobre los circuitos de resistencias se procedió a la calibración del Sistema de Efecto Hall a través de la realización de medidas sobre dos muestras de cobre, la primera diseñada para hacer medidas con el sistema de Cuatro Puntas, y segunda diseñada para calibrar la técnica de Van Der Pauw. Estas dos muestras de cobre fueron obtenidas del portamuestra (o circuito impreso) utilizado para contactar muestras de material mencionado en sección anterior. En la figura 3.3 se presenta una imagen de estos dos portamuestras de cobre.

La utilización de estos circuitos impresos de cobre para realizar medidas Hall tiene muchas ventajas en relación al uso de las muestras de material habituales, entre ellas se encuentra una garantía de muestra homogénea, evita la realización de contactos en el perímetro de la muestra para hacer pruebas Hall, y da la posibilidad de elegir el tipo de geometría del material, en este caso se eligió una geometría rectangular cuyas dimensiones fueron de 2cm por 1cm. El espesor de estas muestras de cobre, necesario para la determinación de resistividad y densidad de portadores, fue determinado mediante el uso de un micrómetro y una técnica de ultrasonido [52], con un valor obtenido de $36 \pm 3 \, \mu\text{m}$.

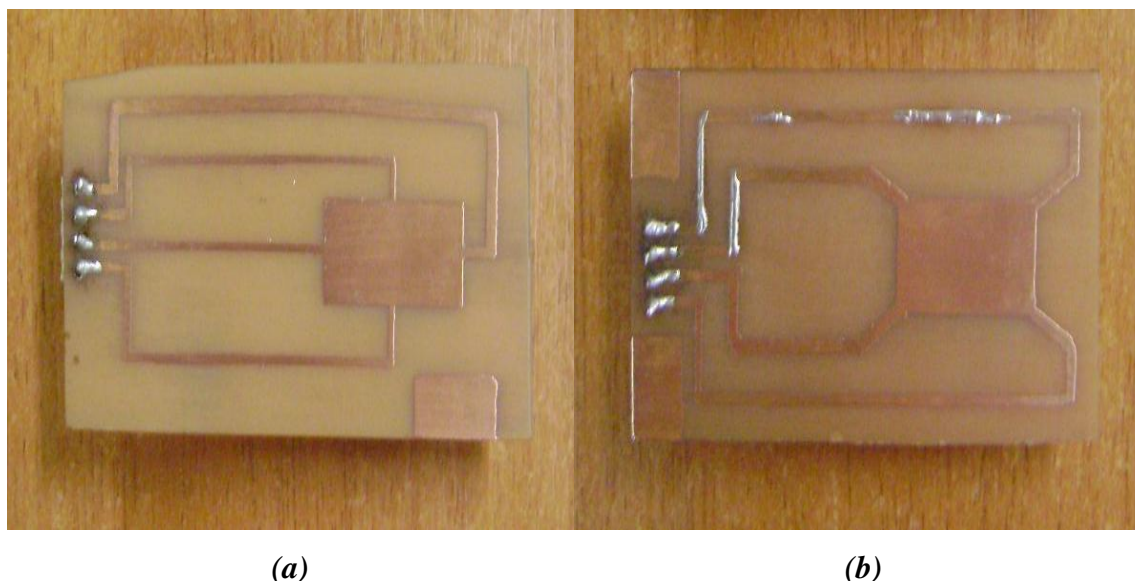


Figura 3.3. Imagen de los Portamuestras de Cobre: **(a)** Primera Muestra de Cobre, **(b)** Segunda Muestra de Cobre.

3.2.1 Medidas sobre la Primera Muestra de Cobre

Esta muestra de cobre fue diseñada para la realización de medidas mediante la técnica de Cuatro Puntas sin conmutación de corriente. En las figuras 3.4(a) y 3.4(b) se presentan los gráficos de voltaje Hall en función de la corriente para campos de 200, 400, 600 y 800 mT y de voltaje Hall versus campo magnético para corrientes de 25, 50, 75, y 100 mA respectivamente.

En estos gráficos se puede ver, aunque con medidas algo dispersas ($\pm 0.025 \mu\text{V}$ de desviación), una tendencia lineal de los puntos medidos con la variación de la corriente y del campo, además también se puede ver un aumento en las pendientes de las rectas a medida que se incrementa el campo para el gráfico en función de la corriente, y a medida que se incrementa la corriente para el gráfico en función del campo, tal y como lo indica la teoría, ver ecuación (45). Esta dispersión en las medidas se debe a que efectos no deseados, como el debido al ruido externo, se hacen muy notables cuando el

voltaje medido (del orden de 10^{-7} V) se aproxima a los nanovoltios. Las rectas correspondientes a estas medidas de voltaje muestran pendientes negativas, lo cual indica que el transporte eléctrico es llevado a cabo por los electrones.

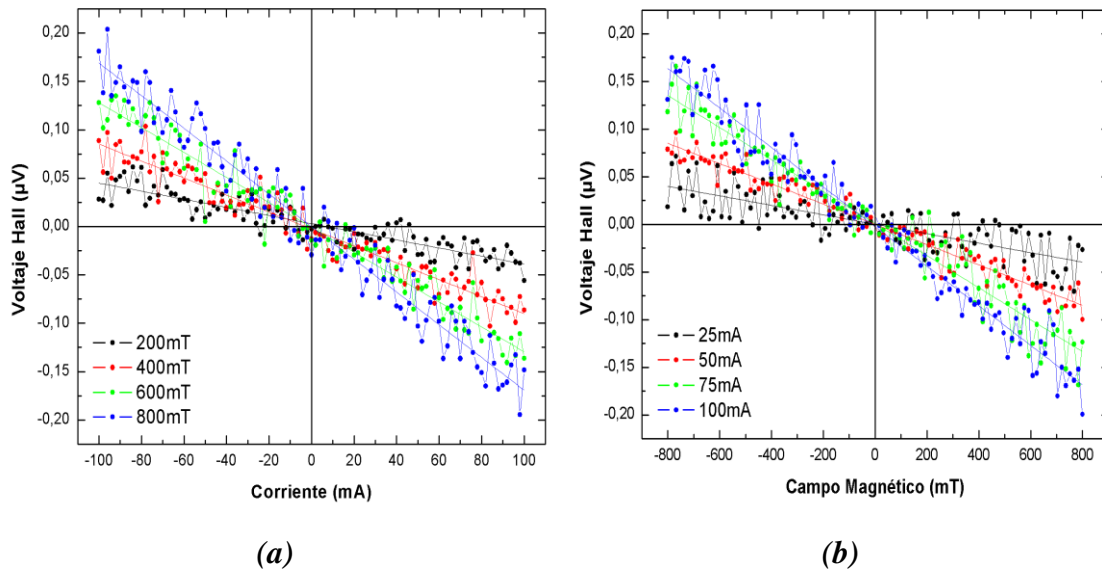


Figura 3.4. Voltaje Hall en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Primera Muestra de Cobre: (a) Voltaje Hall vs Corriente para varios campos constantes (b) Voltaje Hall vs Campo para varias corrientes constantes.

A partir de las pendientes de estas rectas (figuras 3.4(a) y 3.4(b)) se puede deducir el coeficiente Hall (ecuaciones (46) y (47)). Estos valores calculados son de $R_{H1} = -(7.70 \pm 0.14) \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{C}$ y $R_{H2} = -(7.59 \pm 0.38) \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{C}$ para las medidas en función de la corriente y del campo respectivamente, los cuales son muy similares al valor de coeficiente Hall reportado para el cobre ($R_H = -5.3 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{C}$) [15]. También se puede calcular con estas pendientes la densidad de portadores, con valores de $(8.12 \pm 0.15) \times 10^{22} \text{ portadores/cm}^3$ y $(8.25 \pm 0.41) \times 10^{22} \text{ portadores/cm}^3$ para medidas variando corriente y campo respectivamente, los cuales mantienen el orden de magnitud reportado para este material. Lo anterior verifica el buen desempeño del sistema de Cuatro Puntas.

En la figura 3.5 se muestra el gráfico de densidad de portadores (portadores/cm³), construido a partir del gráfico de voltaje Hall, en función de la corriente (mA) para un campo constante de 800 mT para esta muestra. En esta gráfica se puede observar, aunque con medidas algo dispersas, una densidad de portadores del orden de 10^{22} portadores/cm³, este orden de magnitud corresponde a densidades típicas de materiales metálicos. En la figura 3.6 se presenta el gráfico de densidad de portadores (portadores/cm³) en función del campo magnético (mT) para una corriente constante de 100 mA para esta muestra de cobre.

Estas dos gráficas (figuras 3.5 y 3.6) presentan resultados de medidas muy similares, de la figura en función de corriente se puede deducir un valor de concentración de portadores de $(8.46 \pm 1.92) \times 10^{22}$ portadores/cm³ y de la figura en función de campo se deduce un valor de $(8.71 \pm 1.89) \times 10^{22}$ portadores/cm³. Estos resultados concuerdan con la densidad de carga del cobre (8.4×10^{22} portadores/cm³) reportada en la literatura [15,47].

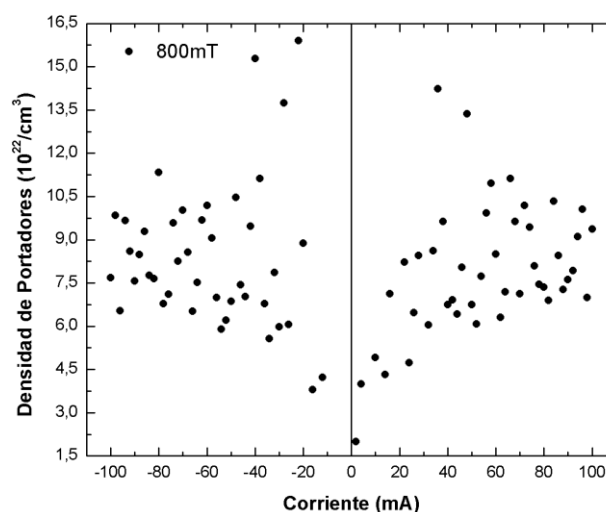


Figura 3.5. Densidad de Portadores en función de la Corriente para la Primera Muestra de Cobre.

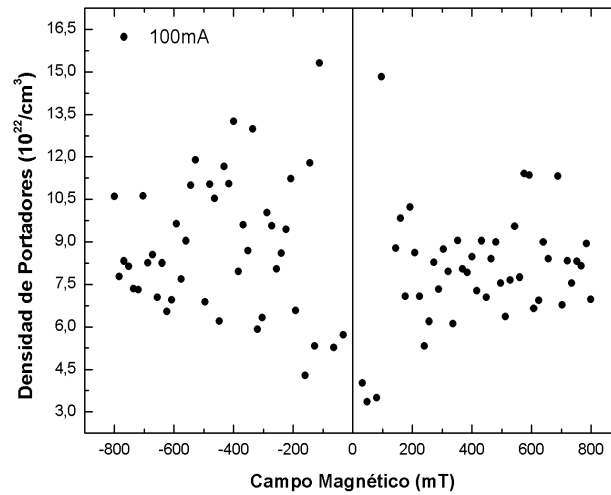


Figura 3.6. *Densidad de Portadores en función del Campo Magnético para la Primera Muestra de Cobre.*

En las tablas 3.3(a) y 3.3(b) se muestran los resultados de densidad de portadores (10^{22} cm^{-3}) y de coeficiente Hall ($10^{-5} \text{ cm}^3/\text{C}$) variando corriente y campo respectivamente para todos los campos y corrientes constantes trabajados, siendo este último calculado a partir de la densidad (ver ecuación (21)). Y en la figura 3.7 se presentan todos los gráficos de densidad de carga y de coeficiente Hall contruidos a partir de estas tablas.

Estos resultados muestran valores de densidad de carga y de coeficiente Hall muy parecidos para ambos procesos (variando corriente y campo) con una poca variación de los resultados promedios (ver escala de gráficos), aunque con una considerable desviación de los resultados individuales (ver desviaciones en tablas) la cual disminuye con el aumento del campo magnético y de la corriente aplicados a la muestra. Estos resultados son muy similares a los reportados para el cobre ($R_H = -5.3 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{C}$) en donde el signo negativo del coeficiente indica a los electrones como portadores de [15].

En las tablas 3.4(a) y 3.4(b) se presentan los resultados de movilidad de portadores, de

tiempo libre medio (10^{-14} s), y de recorrido libre medio (10^{-7} cm) variando corriente y campo respectivamente para todos los campos y corrientes constantes trabajados. Estos

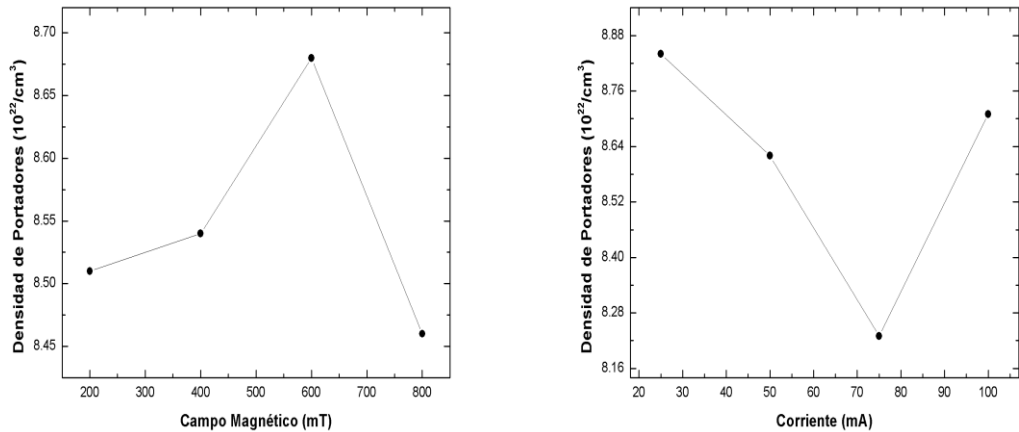
Variando Corriente	Densidad de Portadores (10^{22} cm^{-3})	Coefficiente Hall ($10^{-5} \text{ cm}^3/\text{C}$)
para 200 mT	8.51 ± 3.18	$-(7.34 \pm 4.37)$
para 400 mT	8.54 ± 2.75	$-(7.32 \pm 3.48)$
para 600 mT	8.68 ± 2.48	$-(7.20 \pm 2.87)$
para 800 mT	8.46 ± 1.92	$-(7.38 \pm 2.17)$

(a)

Variando Campo	Densidad de Portadores (10^{22} cm^{-3})	Coefficiente Hall ($10^{-5} \text{ cm}^3/\text{C}$)
para 25 mA	8.84 ± 3.31	$-(7.07 \pm 4.22)$
para 50 mA	8.62 ± 2.54	$-(7.25 \pm 3.03)$
para 75 mA	8.23 ± 2.39	$-(7.59 \pm 3.10)$
para 100 mA	8.71 ± 1.89	$-(7.18 \pm 2.00)$

(b)

Tabla 3.3. Resultados de Densidad de Portadores y de Coeficiente Hall para la Primera Muestra de Cobre: **(a)** Resultados variando Corriente, **(b)** Resultados variando Campo.



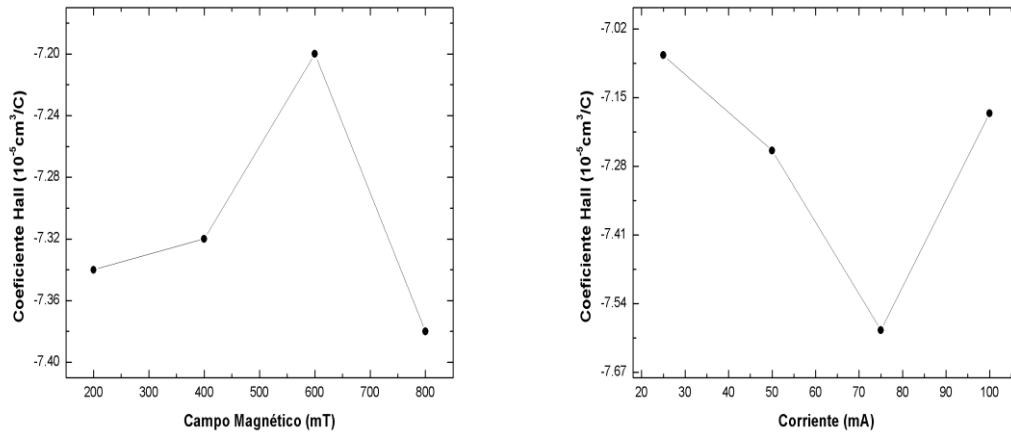


Figura 3.7. Gráficos de los Resultados de Densidad de Portadores y de Coeficiente Hall para la Primera Muestra de Cobre.

valores fueron calculados a partir de la densidad de carga, y de la resistencia superficial (ver sección 3.2.2), mediante las ecuaciones (57), (25) y (26). En la figura 3.8 se muestran todos los gráficos de movilidad, de tiempo y recorrido libre medio diseñados a partir de estas tablas.

Estos resultados presentan valores de movilidad, de tiempo libre medio, y de recorrido libre medio muy similares variando corriente y variando campo, y con una considerable desviación de medida (ver tablas) la cual se reduce con el incremento del campo magnético y de la corriente. Estos resultados son muy similares a los reportados en la literatura ($\tau_c = 2.5 \times 10^{-14} \text{ s}$; $\ell = 3.0 \times 10^{-7} \text{ cm}$) para este material [2,47].

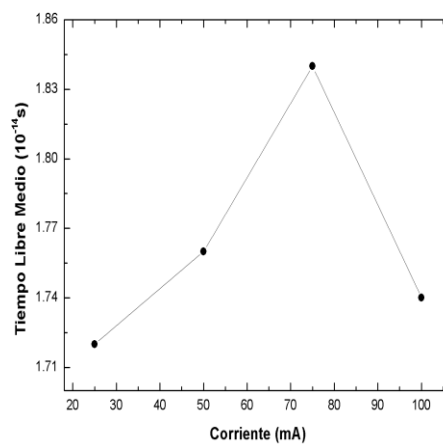
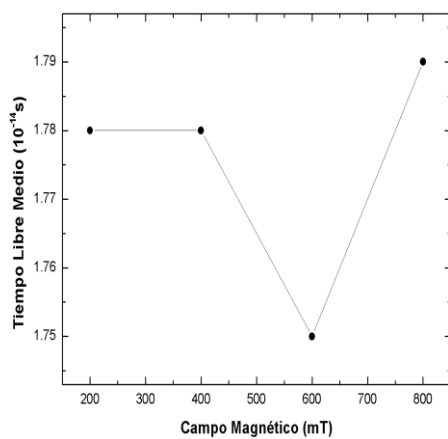
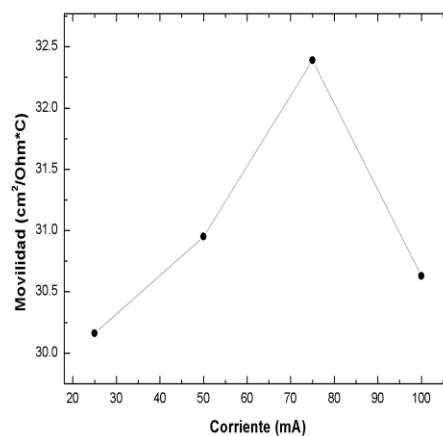
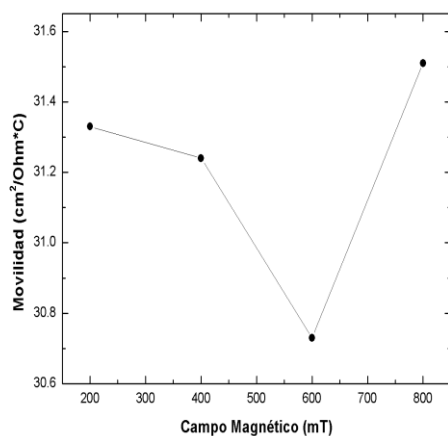
Variando Corriente	Movilidad ($\text{cm}^2/\Omega \cdot \text{C}$)	Tiempo Libre Medio (10^{-14} s)	Recorrido Libre Medio (10^{-7} cm)
para 200 mT	31.33 ± 18.66	1.78 ± 1.06	1.69 ± 1.01
para 400 mT	31.24 ± 14.84	1.78 ± 0.84	1.69 ± 0.80
para 600 mT	30.73 ± 12.26	1.75 ± 0.70	1.66 ± 0.66
para 800 mT	31.51 ± 9.26	1.79 ± 0.53	1.70 ± 0.50

(a)

Variando Campo	Movilidad ($\text{cm}^2/\Omega\cdot\text{C}$)	Tiempo Libre Medio (10^{-14} s)	Recorrido Libre Medio (10^{-7} cm)
para 25 mA	30.16 ± 18.01	1.72 ± 1.03	1.63 ± 0.97
para 50 mA	30.95 ± 12.94	1.76 ± 0.74	1.67 ± 0.70
para 75 mA	32.39 ± 13.22	1.84 ± 0.75	1.75 ± 0.72
para 100 mA	30.63 ± 8.52	1.74 ± 0.49	1.66 ± 0.46

(b)

Tabla 3.4. Resultados de Movilidad, de Tiempo Libre Medio, y de Recorrido Libre Medio para la Primera Muestra de Cobre: (a) Resultados variando Corriente, b) Resultados variando Campo.



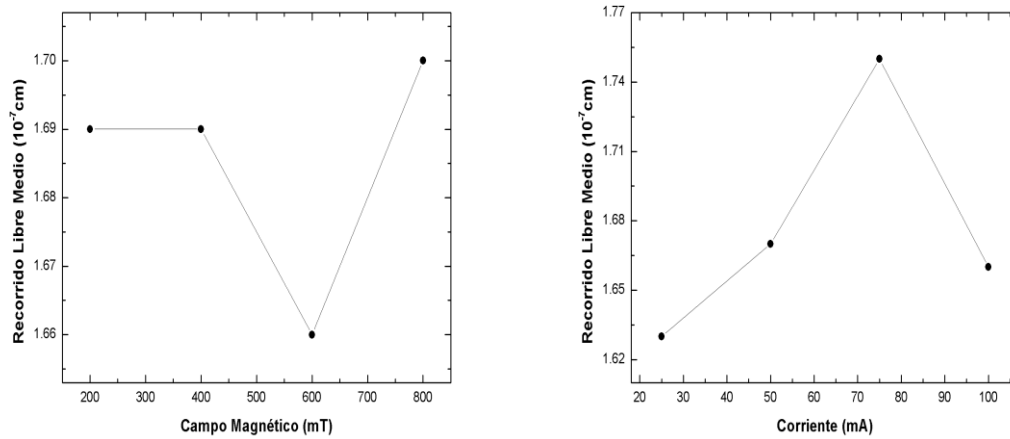


Figura 3.8. Gráficos de los Resultados de Movilidad, de Tiempo Libre Medio, y de Recorrido Libre Medio para la Primera Muestra de Cobre.

3.2.2 Medidas sobre segunda Muestra de Cobre

Segunda muestra de cobre fue diseñada para realizar medidas empleando la técnica de Van Der Pauw, inicialmente se hicieron medidas de resistividad y luego se procedió a realizar medidas de efecto Hall en función de la corriente y del campo. Los resultados de resistencia superficial (R_s) y de resistividad (ρ) son mostrados en la tabla 3.5.

El resultado de resistencia superficial de $(6.51 \pm 0.54) \times 10^{-4} \Omega$ es mucho menor al obtenido para el circuito de baja resistencia, esto se debe a la baja resistencia de esta muestra (0.4Ω). La resistividad medida de $(2.34 \pm 0.19) \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ es típica de materiales metálicos (del orden de $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$), y es muy similar a la registrada para el cobre, la cual es de $1.72 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ [18].

En las figuras 3.9 y 3.10 se presentan los gráficos de densidad de portadores en función de la corriente para un campo magnético constante de 800 mT, y de densidad de

No	R_s (Ω)	ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)
1	7.42564E-4	2.67323E-6
2	6.96468E-4	2.50728E-6
3	6.80227E-4	2.44882E-6
4	6.40825E-4	2.30697E-6
5	5.89538E-4	2.12234E-6
6	5.93972E-4	2.13830E-6
7	7.10991E-4	2.55957E-6
8	6.29890E-4	2.26760E-6
9	6.29873E-4	2.26754E-6
10	5.95219E-4	2.14279E-6
Promedio	6.50957E-4	2.34344E-6
Desviación	$\pm 0.53791\text{E-}4$	$\pm 0.19365\text{E-}6$

Tabla 3.5. Resultados de Resistencia Superficial y de Resistividad para segunda Muestra de Cobre.

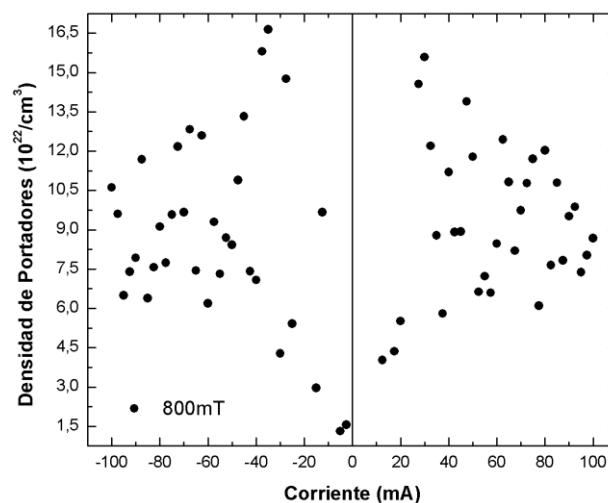


Figura 3.9. Densidad de Portadores en función de la Corriente para la Segunda Muestra de Cobre.

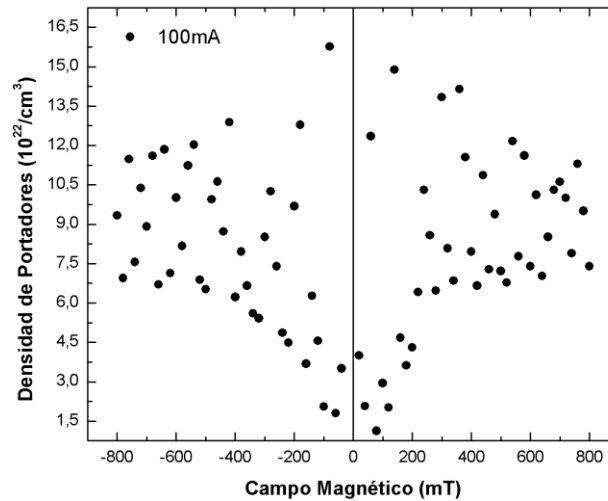


Figura 3.10. Densidad de Portadores en función del Campo Magnético para la Segunda Muestra de Cobre.

portadores en función del campo magnético para una corriente constante de 100 mA, respectivamente. Ambos gráficos muestran densidades del orden de 10^{22} portadores/cm³, este orden de densidad coincide con la de los materiales metálicos.

En las figuras 3.11 y 3.12 se muestran las gráficas de movilidad en función de la corriente para un campo constante de 800 mT, y en función del campo magnético para una corriente constante de 100 mA respectivamente. En ambas gráficas se puede ver valores de movilidad del orden de 10^1 cm²/Ω·C el cual se ubica en el rango metálico.

A partir de las dos últimas gráficas de concentración de portadores (figuras 3.9 y 3.10) se puede obtener un valor de densidad de $(9.25 \pm 2.09) \times 10^{22}$ portadores/cm³ variando corriente y de $(9.00 \pm 2.16) \times 10^{22}$ portadores/cm³ variando campo de esta muestra, y a partir de las gráficas de movilidad (figuras 3.11 y 3.12) se deduce un valor de movilidad de 30.27 ± 6.69 cm²/Ω·C y 31.31 ± 7.38 cm²/Ω·C variando corriente y campo

respectivamente. Todos estos valores obtenidos (resistividad, densidad y movilidad) se aproximan a los descritos en los libros de física de materiales para el cobre [47,50].

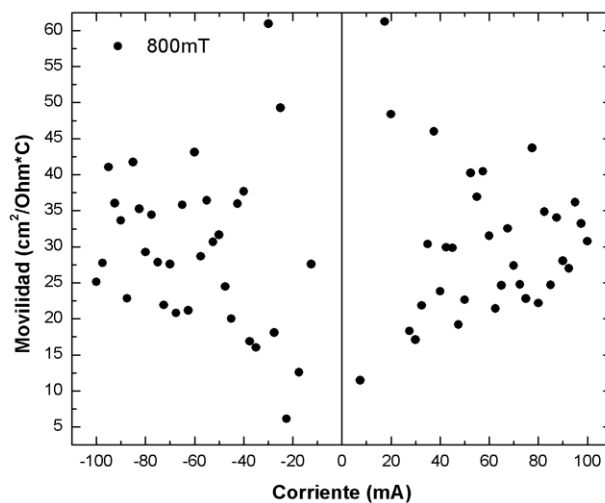


Figura 3.11. Movilidad en función de la Corriente para segunda Muestra de Cobre.

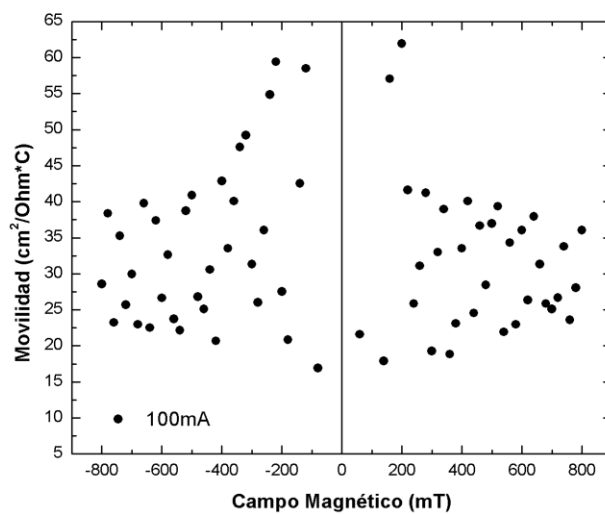


Figura 3.12. Movilidad en función del Campo Magnético para segunda Muestra de Cobre.

Existen muchas posibles causas que pueden separar los valores medidos de resistividad y densidad de los valores reportados; entre estas causas están una leve variación en la homogeneidad de la muestra, una muestra levemente contaminada con otros materiales (no pura), y la dificultad para medir el voltaje Hall del cobre con estas condiciones de campo y corriente. Estas causas de error, sobre todo la última, son las principales responsables de la dispersión de medidas observada para la primera y segunda muestra.

3.3 Medidas de magnetotransporte en Cintas Magnéticas basadas en Cobalto

Se realizaron medidas de efecto Hall sobre cintas amorfas magnéticamente blandas de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$ y $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ con el fin de conocer sus propiedades de transporte eléctrico. Estas cintas magnéticas fueron producidas por medio de la técnica de *Melt Spinning*, la cual es una técnica de solidificación o enfriamiento rápido. Estas cintas magnéticas blandas se caracterizan por tener ciclos de histéresis estrechos, bajas fuerzas coercitivas y alta permeabilidad magnética, en otras palabras, son materiales fácilmente magnetizables y desmagnetizables; también se caracterizan por ser buenos conductores eléctricos. En general, los materiales magnéticos blandos que presenten las mejores propiedades eléctricas y magnéticas, encuentran su aplicación en núcleos de inductores y amplificadores, en detección de posición sin contacto, en sensores de corriente, entre otras aplicaciones tecnológicas.

Estas dos muestras magnéticas fueron preparadas de forma rectangular con dimensiones de 2 cm por 0.5 cm, y se contactaron a un portamuestra, o circuito impreso diseñado según dichas dimensiones, por medio de pintura conductora de plata como se discutió en sección anterior. Sobre la cinta de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$ se realizaron medidas Hall empleando la técnica de Cuatro Puntas y medidas de resistividad, mientras que con la cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ se hicieron medidas a través de la técnica de Cuatro Puntas, la técnica de Van Der Pauw, y la técnica de efecto Hall AC, como se verá más adelante. El espesor de estas cintas, necesario para la determinación de la concentración de portadores, fue de

$20 \pm 3 \mu\text{m}$ medido con la ayuda de un calibrador digital [53], el cual es un espesor típico de cintas producidas por la técnica de *Melt Spinning*.

3.3.1 Caracterización eléctrica de la Cinta de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$

Sobre esta cinta se realizaron medidas Hall mediante la técnica de Cuatro Puntas sin conmutación y medidas de resistividad con la técnica de Van Der Pauw. Inicialmente, se hicieron medidas de voltaje o tensión Hall sobre la muestra variando la corriente entre -10 y 10 mA, estas medidas se realizaron en presencia de un campo magnético constante, con campos que van desde 20 a 120 mT con incrementos de 20 mT. Luego, se hicieron medidas de voltaje Hall variando el campo magnético entre -120 y 120 mT, con corrientes constantes que van desde 1,43 a 10 mA con incrementos de 1,43 mA. A partir de estas medidas se diseñaron las gráficas de voltaje Hall versus corriente y de voltaje Hall versus campo para esta cinta magnética, las cuales son mostradas en las figuras 3.13(a) y 3.13(b) respectivamente.

Ambas gráficas (figura 3.13) muestran una relación lineal (directamente proporcional) del voltaje Hall con la corriente y con el campo magnético aplicado, con voltajes medidos del orden de 10^{-6} V para esta muestra. En la gráfica de voltaje versus corriente se observa un aumento de la pendiente de la recta con el incremento del campo aplicado, y en la de voltaje contra campo se puede ver un aumento de la pendiente a medida que aumenta la corriente suministrada a la cinta. La pendiente positiva de estas rectas indica que los portadores de carga son los electrones de carga “positiva” (electrones ocupando orbitales cerca del máximo de la banda), siendo el Cobalto (Co) el principal responsable de este tipo de portador [55].

A partir de estas medidas de voltaje Hall se construyeron las gráficas de densidad de portadores en función de la corriente y de densidad de portadores en función del campo magnético aplicado para dicha cinta, las cuales se pueden observar en las figuras 3.14 y 3.15 respectivamente.

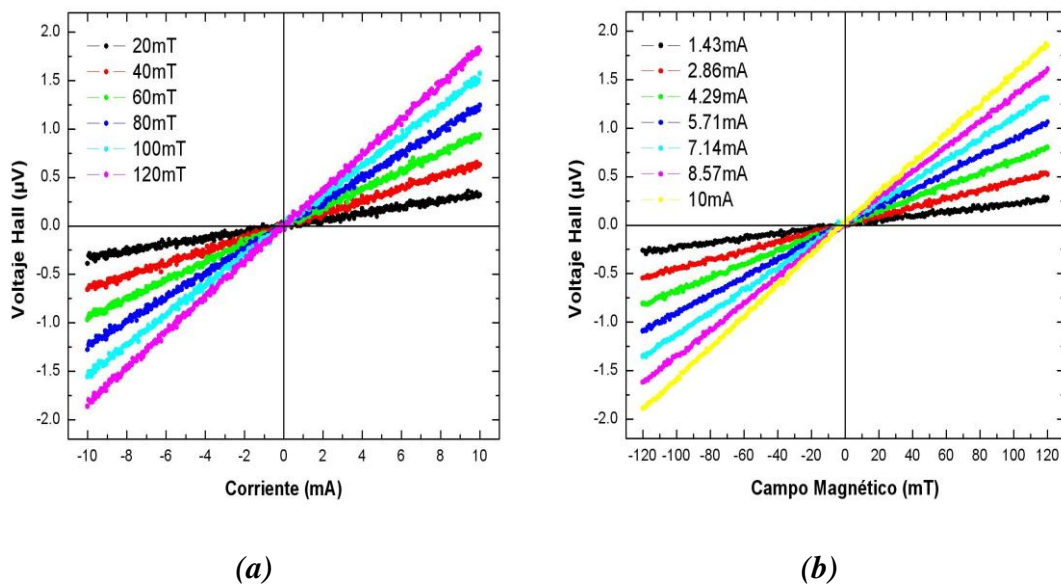


Figura 3.13. Voltaje Hall en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta de $Co_{71}Fe_4B_{15}Si_{10}$: (a) Voltaje Hall vs Corriente para varios campos constantes, (b) Voltaje Hall vs Campo para varias corrientes constantes.

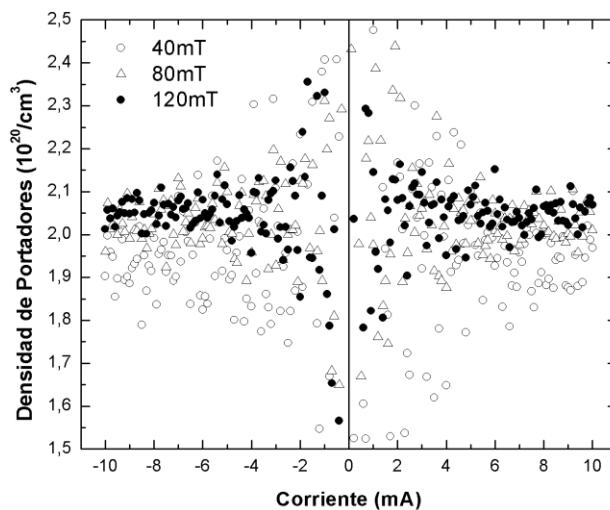


Figura 3.14. Densidad de Portadores en función de la Corriente para la Cinta de $Co_{71}Fe_4B_{15}Si_{10}$.

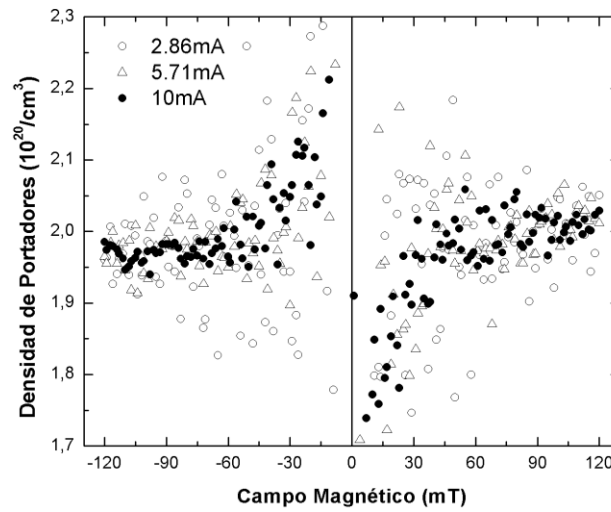


Figura 3.15. *Densidad de Portadores en función del Campo Magnético para la Cinta de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$.*

Las figuras 3.14 y 3.15 presentan gráficas de densidad de portadores muy similares; en la gráfica de densidad contra corriente se puede observar una disminución en la dispersión de los puntos medidos con el aumento del campo magnético aplicado a la cinta; y en la gráfica de densidad versus campo se puede ver una disminución en la dispersión de las medidas con el aumento de la corriente aplicada; igualmente se puede decir que hay un aumento en la dispersión de medidas con la reducción de la corriente y del campo aplicado. De estas gráficas de concentración de portadores se puede deducir los valores de densidad (10^{20} cm^{-3}) y coeficiente Hall ($10^{-2} \text{ cm}^3/\text{C}$) variando corriente y campo (para todos los campos y corrientes constantes) de la cinta magnética $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$ los cuales se muestran en las tablas 3.6(a) y 3.6(b), y en la figura 3.16 se presentan todos los gráficos de densidad de carga y de coeficiente Hall contruidos a partir de estas tablas. Este valor de densidad sitúa a esta cinta en el rango intermedio entre los metales y los semiconductores [15,48,49], siendo la parte metálica aportada por el Cobalto (Co) y el Hierro (Fe) y el carácter semiconductor aportado por el Boro (B) y

el Silicio (Si). Este resultado de densidad concuerda con su baja resistencia, la cual es de 1.57Ω .

Estos resultados (tabla 3.6 y figura 3.16) muestran valores de densidad de carga y de coeficiente Hall muy similares variando corriente y campo, con una baja desviación de los resultados (ver desviaciones en tablas) la cual disminuye con el aumento del campo magnético y de la corriente aplicados. En la gráfica de densidad en función del campo se puede ver un leve incremento en su valor con el aumento del campo, mientras

Variando Corriente	Densidad de Portadores (10^{20} cm^{-3})	Coeficiente Hall ($10^{-2} \text{ cm}^3/\text{C}$)
para 20 mT	1.914 ± 0.196	3.266 ± 0.373
para 40 mT	1.953 ± 0.125	3.201 ± 0.218
para 60 mT	1.993 ± 0.088	3.136 ± 0.146
para 80 mT	2.034 ± 0.077	3.073 ± 0.120
para 100 mT	2.039 ± 0.053	3.065 ± 0.082
para 120 mT	2.052 ± 0.044	3.045 ± 0.066

(a)

Variando Campo	Densidad de Portadores (10^{20} cm^{-3})	Coeficiente Hall ($10^{-2} \text{ cm}^3/\text{C}$)
para 1.43 mA	1.981 ± 0.156	3.154 ± 0.270
para 2.86 mA	1.981 ± 0.082	3.154 ± 0.136
para 4.29 mA	1.997 ± 0.067	3.129 ± 0.108
para 5.71 mA	1.988 ± 0.055	3.144 ± 0.090
para 7.14 mA	1.993 ± 0.040	3.135 ± 0.064
para 8.57 mA	1.993 ± 0.037	3.136 ± 0.059
para 10 mA	1.990 ± 0.038	3.141 ± 0.061

(b)

Tabla 3.6. Resultados de Densidad de Portadores y de Coeficiente Hall para la Cinta de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$: (a) Resultados variando Corriente, (b) Resultados variando Campo.

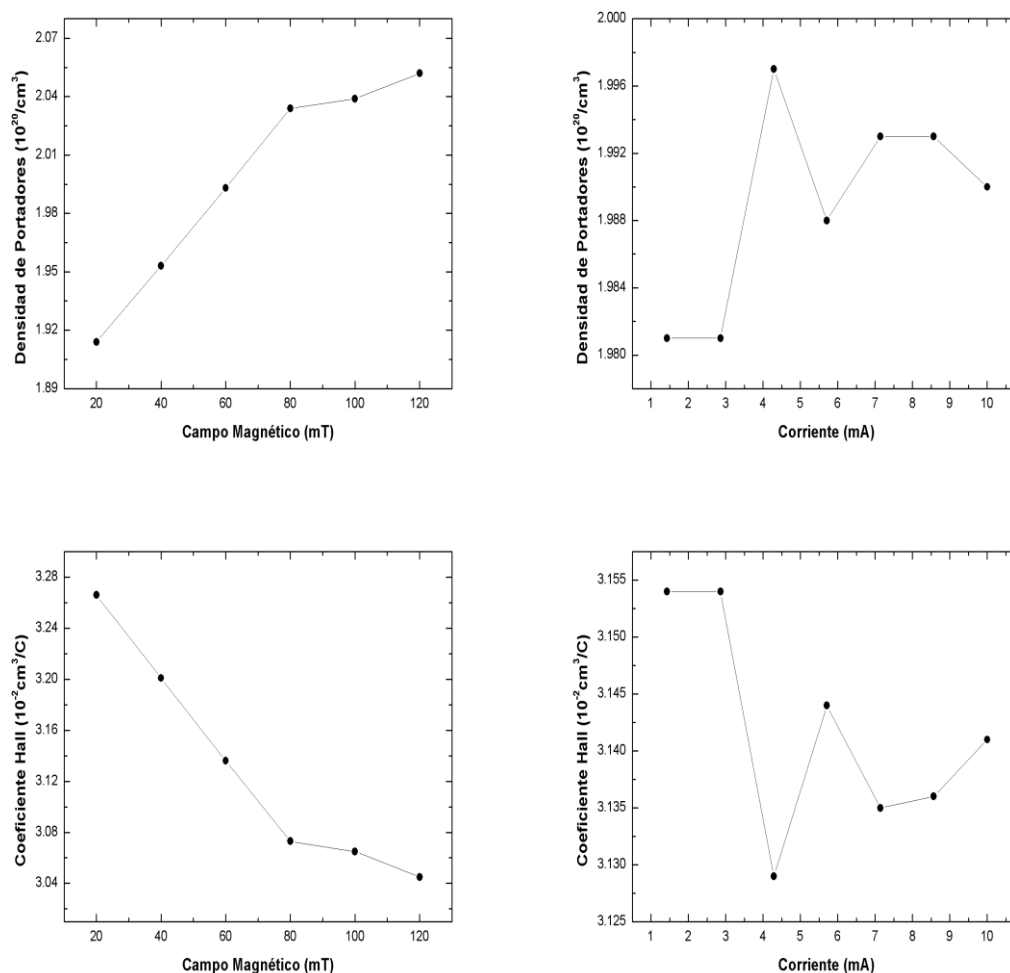


Figura 3.16. Gráficos de los Resultados de Densidad de Portadores y de Coeficiente Hall para la Cinta de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$.

que el coeficiente Hall disminuye con incremento del campo, y en las gráficas en función de la corriente los resultados casi no varían (ver escala de gráficas).

Sobre esta cinta también se realizaron medidas de resistividad por medio del sistema de Van Der Pauw, los resultados de estas medidas son mostrados en la tabla 3.7, en donde R_s es la resistencia superficial y ρ la resistividad.

No	Rs (Ω)	ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)
1	0.112455	2.24910E-4
2	0.109474	2.18949E-4
3	0.105271	2.10541E-4
4	0.111572	2.23144E-4
5	0.109266	2.18531E-4
6	0.106020	2.12041E-4
7	0.114206	2.28412E-4
8	0.112782	2.25563E-4
9	0.107866	2.15732E-4
10	0.110683	2.21366E-4
Promedio	0.109960	2.19919E-4
Desviación	± 0.002940	$\pm 0.05886E-4$

Tabla 3.7. Resultados de Resistencia Superficial y de Resistividad para la Cinta Magnética de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$.

En esta tabla (tabla 3.7) se puede ver una resistencia superficial de $0.110 \pm 0.003 \Omega$ la cual está de acorde con su baja resistencia. El valor de resistividad de $(2.20 \pm 0.06) \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ de esta cinta, es característico de materiales intermedios entre los metales y los semiconductores [45,46].

En las tablas 3.8(a) y 3.8(b) se presentan los resultados de movilidad, de tiempo libre medio (10^{-14} s), y de recorrido libre medio (10^{-7} cm) variando corriente y campo respectivamente para todos los campos y corrientes constantes aplicados. Estos valores fueron calculados a partir de los resultados de densidad de carga y de resistencia superficial anteriores, a través de las ecuaciones (57), (25) y (26). En la figura 3.17 se muestran los gráficos de movilidad, de tiempo y recorrido libre medio diseñados a partir de estas tablas.

Estos resultados (tabla 3.8 y figura 3.17) presentan valores de movilidad, de tiempo libre medio, y de recorrido libre medio muy parecidos variando corriente y campo, con

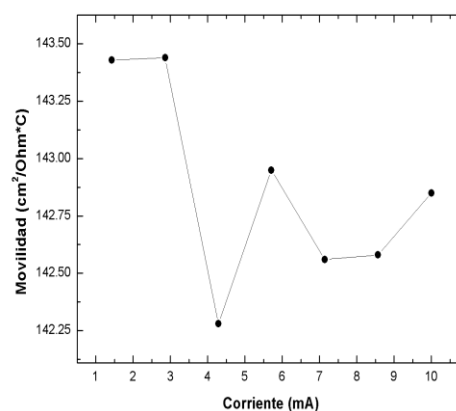
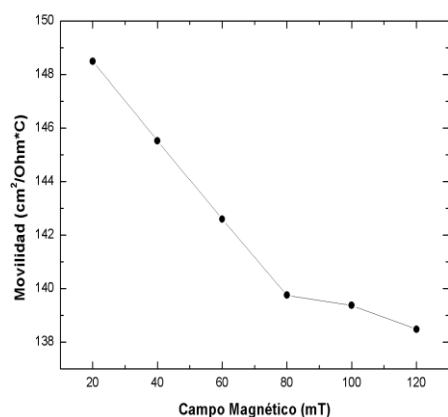
Variando Corriente	Movilidad ($\text{cm}^2/\Omega\cdot\text{C}$)	Tiempo Libre Medio (10^{-14} s)	Recorrido Libre Medio (10^{-7} cm)
para 20 mT	148.50 \pm 16.95	8.455 \pm 0.965	8.032 \pm 0.917
para 40 mT	145.53 \pm 9.92	8.286 \pm 0.565	7.872 \pm 0.537
para 60 mT	142.60 \pm 6.62	8.119 \pm 0.377	7.713 \pm 0.358
para 80 mT	139.75 \pm 5.47	7.957 \pm 0.311	7.559 \pm 0.296
para 100 mT	139.37 \pm 3.74	7.936 \pm 0.213	7.539 \pm 0.202
para 120 mT	138.48 \pm 3.01	7.885 \pm 0.171	7.490 \pm 0.163

(a)

Variando Campo	Movilidad ($\text{cm}^2/\Omega\cdot\text{C}$)	Tiempo Libre Medio (10^{-14} s)	Recorrido Libre Medio (10^{-7} cm)
para 1.43 mA	143.43 \pm 12.29	8.166 \pm 0.700	7.758 \pm 0.665
para 2.86 mA	143.44 \pm 6.20	8.167 \pm 0.353	7.759 \pm 0.335
para 4.29 mA	142.28 \pm 4.90	8.101 \pm 0.279	7.696 \pm 0.265
para 5.71 mA	142.95 \pm 4.09	8.139 \pm 0.233	7.732 \pm 0.221
para 7.14 mA	142.56 \pm 2.92	8.117 \pm 0.166	7.711 \pm 0.158
para 8.57 mA	142.58 \pm 2.68	8.118 \pm 0.152	7.712 \pm 0.145
para 10 mA	142.85 \pm 2.79	8.133 \pm 0.159	7.727 \pm 0.151

(b)

Tabla 3.8. Resultados de Movilidad, de Tiempo Libre Medio, y de Recorrido Libre Medio para la Cinta de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$: (a) Resultados variando Corriente, b) Resultados variando Campo.



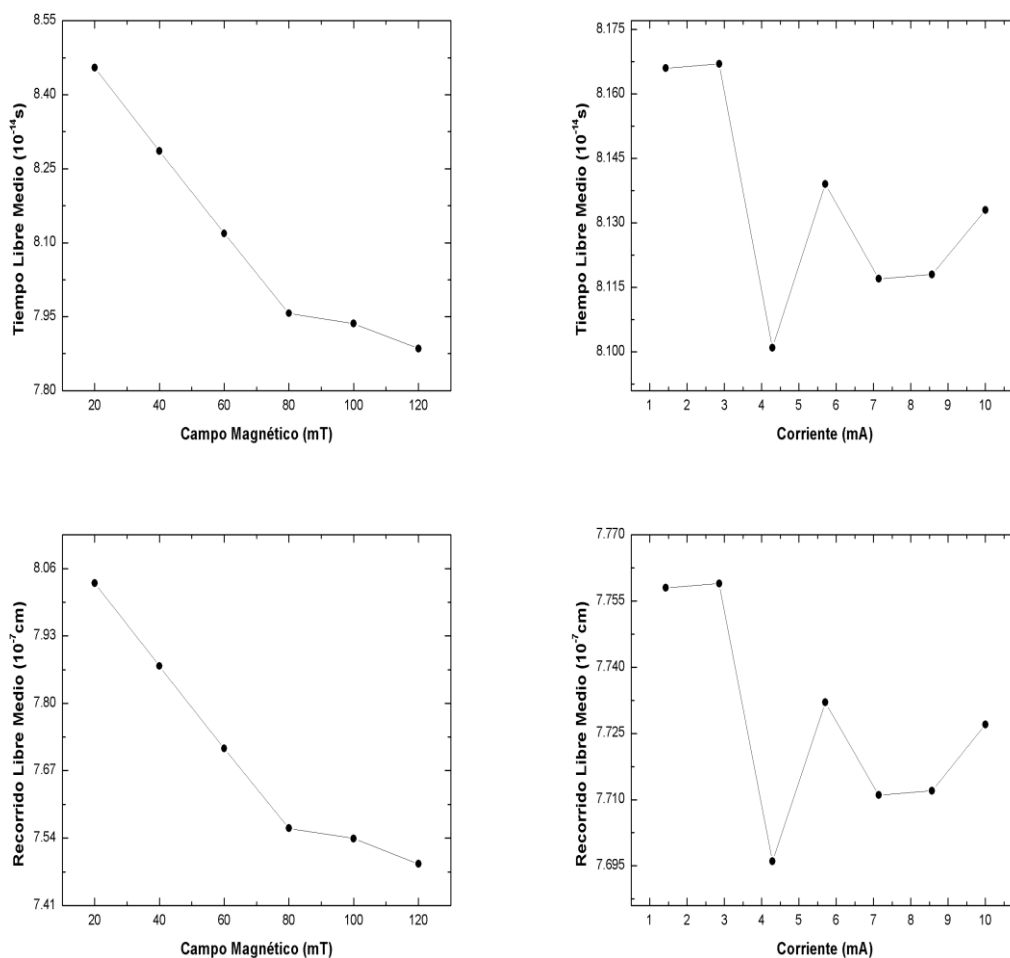


Figura 3.17. Gráficos de los Resultados de Movilidad, de Tiempo Libre Medio, y de Recorrido Libre Medio para la Cinta de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$.

una poca desviación de los resultados, la cual disminuye con el incremento del campo magnético y de la corriente. En las gráficas en función del campo se puede ver una leve disminución de las medidas con el incremento del campo, mientras que en las gráficas en función de la corriente los resultados casi no varían. Estos resultados son del mismo orden que los registrados para los metales, y un poco mayores que los del cobre [2,47].

3.3.2 Caracterización eléctrica de la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$

En esta cinta se realizaron medidas Hall mediante tres técnicas, esto se hizo para conocer sus propiedades eléctricas y corroborar los resultados; los sistemas usados fueron: la técnica de Cuatro Puntas, la técnica de Van Der Pauw, y la técnica de efecto Hall AC. A continuación se mostraran las medidas obtenidas y un análisis de estos resultados.

3.3.2.1 Medidas sobre $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ mediante la Técnica Hall de Cuatro Puntas

Igualmente que para la anterior cinta magnética, para esta cinta se hicieron medidas de voltaje Hall variando la corriente entre -10 y 10 mA para un campo magnético constante, con campos que van desde 20 a 120 mT con incrementos de 20 mT. Luego, se realizaron medidas de tensión Hall variando el campo magnético entre -120 y 120 mT, con corrientes constantes desde 1,43 a 10 mA con incrementos de 1,43 mA. A partir de estas medidas se construyeron las gráficas de voltaje hall versus corriente y versus campo magnético para esta cinta magnética, dichas gráficas son mostradas en las figuras 3.18(a) y 3.18(b) respectivamente.

En estas dos gráficas (figura 3.18) se puede ver una relación lineal del voltaje Hall con la corriente y con el campo magnético, con voltajes del orden de 10^{-7} V para esta cinta. De igual forma que para la muestra de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$, las rectas presentan un aumento en la pendiente con el incremento de los campos y las corrientes aplicadas, y la pendiente positiva de todas las rectas sugiere a los electrones de carga “positiva” (electrones ocupando orbitales cerca del máximo de la banda) como portadores de carga del material, siendo el Cobalto (Co) el principal responsable de este tipo de portador [55].

En las figuras 3.19 y 3.20 se presentan las gráficas de densidad de portadores en función de la corriente y de densidad de portadores en función del campo magnético para dicha cinta respectivamente, estas gráficas de densidad fueron obtenidas de las medidas de voltaje Hall anteriores.

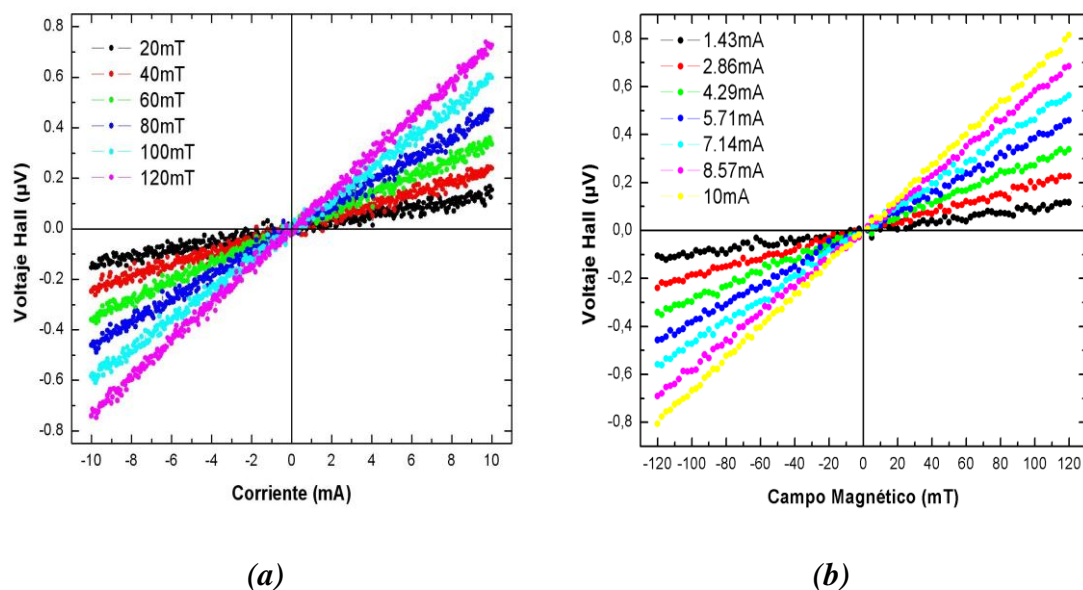


Figura 3.18. Voltaje Hall en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta de $Co_{64}Fe_{21}B_{15}$: (a) Voltaje Hall vs Corriente para varios campos constantes, (b) Voltaje Hall vs Campo para varias corrientes constantes.

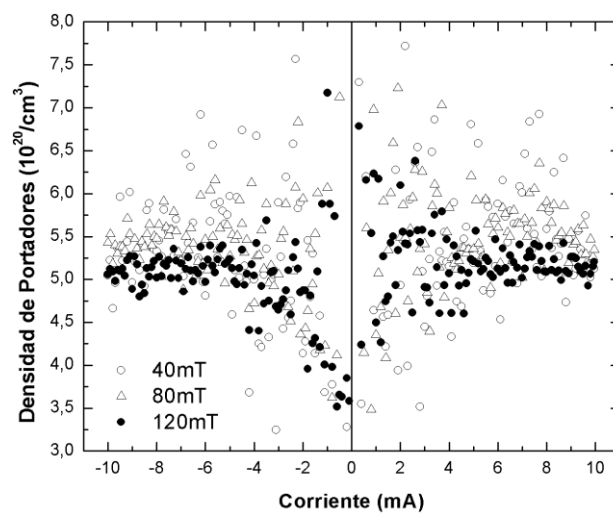


Figura 3.19. Densidad de Portadores en función de la Corriente para la Cinta de $Co_{64}Fe_{21}B_{15}$ (Técnica de Cuatro Puntas).

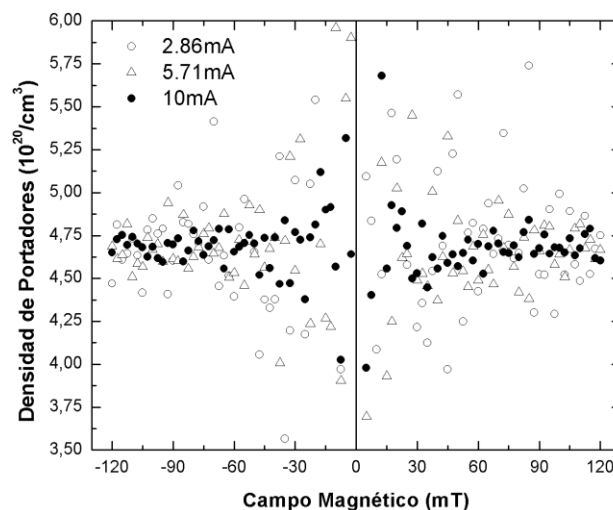


Figura 3.20. Densidad de Portadores en función del Campo Magnético para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ (Técnica de Cuatro Puntas).

En ambas gráficas (figuras 3.19 y 3.20) se puede ver una disminución en la dispersión de los puntos medidos con el aumento del campo magnético y de la corriente aplicadas a la cinta (igual que con $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$). A partir de estas gráficas se puede deducir los valores de concentración de portadores (10^{20} cm^{-3}) y de coeficiente Hall ($10^{-2} \text{ cm}^3/\text{C}$) variando corriente y campo magnético para los campos y corrientes constantes trabajados para esta cinta, los cuales se presentan en las tablas 3.9(a) y 3.9(b), y en la figura 3.21 se muestran los gráficos de densidad y de coeficiente Hall diseñados a partir de estas tablas. Este orden de densidad corresponde a un material intermedio entre metales y semiconductores, en donde la parte metálica es aportada por el Cobalto y el Hierro, y el carácter semiconductor es aportado por el Boro; también se puede decir que se trata de un buen conductor eléctrico, aunque no tan bueno como el cobre [15,47-49]. Además la baja resistencia de esta cinta (0.64Ω) concuerda con este orden de densidad.

Estos resultados (tabla 3.9 y figura 3.21) presentan valores de densidad y de coeficiente Hall muy parecidos para ambas medidas (variando corriente y campo), con una poca desviación de los resultados (ver tablas) la cual se reduce con el incremento del campo y de la corriente aplicados. En estas gráficas se puede observar la relación inversamente proporcional entre el coeficiente Hall y la densidad de portadores, y en las gráficas en función de la corriente los resultados casi no varían (ver escala) en comparación con los que están en función de campo.

Variando Corriente	Densidad de Portadores (10^{20} cm^{-3})	Coeficiente Hall ($10^{-2} \text{ cm}^3/\text{C}$)
para 20 mT	4.791±0.988	1.305±0.339
para 40 mT	5.432±0.648	1.151±0.156
para 60 mT	5.457±0.449	1.145±0.103
para 80 mT	5.469±0.354	1.143±0.079
para 100 mT	5.272±0.245	1.185±0.058
para 120 mT	5.127±0.218	1.219±0.054

(a)

Variando Campo	Densidad de Portadores (10^{20} cm^{-3})	Coeficiente Hall ($10^{-2} \text{ cm}^3/\text{C}$)
para 1.43 mA	4.745±0.771	1.317±0.255
para 2.86 mA	4.721±0.448	1.324±0.139
para 4.29 mA	4.699±0.257	1.330±0.077
para 5.71 mA	4.686±0.218	1.334±0.065
para 7.14 mA	4.687±0.187	1.334±0.055
para 8.57 mA	4.685±0.109	1.334±0.032
para 10 mA	4.672±0.086	1.338±0.025

(b)

Tabla 3.9. Resultados de Densidad de Portadores y de Coeficiente Hall para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$: (a) Resultados variando Corriente, b) Resultados variando Campo.

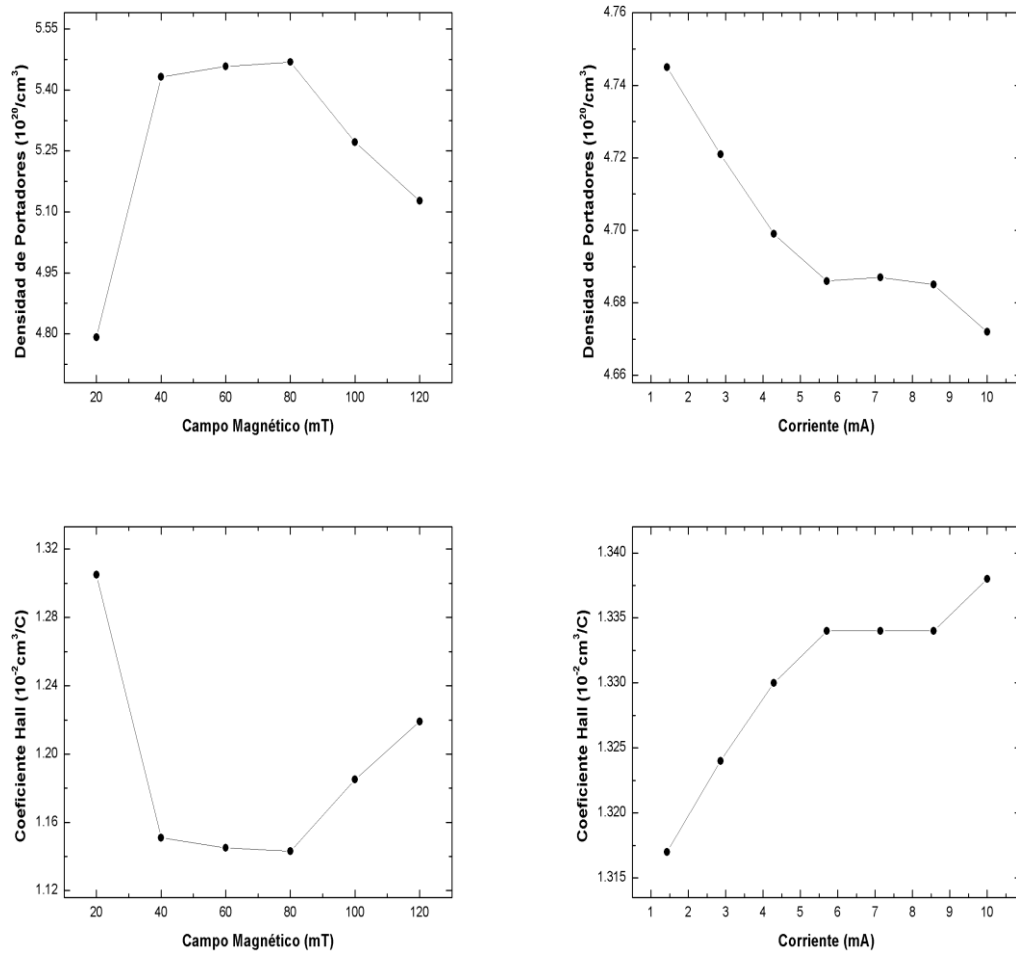


Figura 3.21. Gráficos de los Resultados de Densidad de Portadores y de Coeficiente Hall para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$.

En las tablas 3.10(a) y 3.10(b) se muestran los resultados de movilidad, de tiempo libre medio (10^{-14} s), y de recorrido libre medio (10^{-7} cm) variando corriente y campo respectivamente para los campos y corrientes constantes trabajados. Estos resultados fueron calculados mediante los valores de densidad de carga anteriores, y la resistencia superficial (ver sección 3.3.2.2), a partir de las ecuaciones (57), (25) y (26). En la figura 3.22 se presentan los gráficos de movilidad, de tiempo y recorrido libre medio contruidos a partir de estas tablas.

Estos resultados (tabla 3.10 y figura 3.22) muestran valores de movilidad, de tiempo libre medio, y de recorrido libre medio muy similares para ambas tablas (variando corriente y campo), con una baja desviación de medida (ver tablas) la cual disminuye con el aumento del campo y de la corriente. En estas gráficas se puede ver la relación directamente proporcional entre las tres magnitudes físicas (inversa a la densidad de carga), y en las gráficas en función de la corriente se puede observar que los resultados casi no varían (ver escala). Estos resultados son un poco mayores que los del cobre y un poco menores que los de la cinta de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$ (del mismo orden de magnitud).

Variando Corriente	Movilidad ($\text{cm}^2/\Omega\cdot\text{C}$)	Tiempo Libre Medio (10^{-14} s)	Recorrido Libre Medio (10^{-7} cm)
para 20 mT	104.23±27.09	5.935±1.543	5.638±1.466
para 40 mT	91.93±12.46	5.234±0.709	4.972±0.674
para 60 mT	91.51±8.21	5.210±0.467	4.950±0.444
para 80 mT	91.30±6.32	5.199±0.360	4.939±0.342
para 100 mT	94.72±4.62	5.393±0.263	5.123±0.250
para 120 mT	97.41±4.33	5.546±0.246	5.269±0.234

(a)

Variando Campo	Movilidad ($\text{cm}^2/\Omega\cdot\text{C}$)	Tiempo Libre Medio (10^{-14} s)	Recorrido Libre Medio (10^{-7} cm)
para 1.43 mA	105.23±20.40	5.992±1.162	5.692±1.104
para 2.86 mA	105.78±11.10	6.023±0.632	5.722±0.600
para 4.29 mA	106.27±6.15	6.051±0.350	5.748±0.333
para 5.71 mA	106.57±5.20	6.068±0.296	5.764±0.281
para 7.14 mA	106.55±4.42	6.066±0.251	5.763±0.239
para 8.57 mA	106.58±2.54	6.069±0.145	5.765±0.138
para 10 mA	106.89±2.00	6.086±0.114	5.782±0.108

(b)

Tabla 3.10. Resultados de Movilidad, de Tiempo Libre Medio, y de Recorrido Libre Medio para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$: **(a)** Resultados variando Corriente, **(b)** Resultados variando Campo.

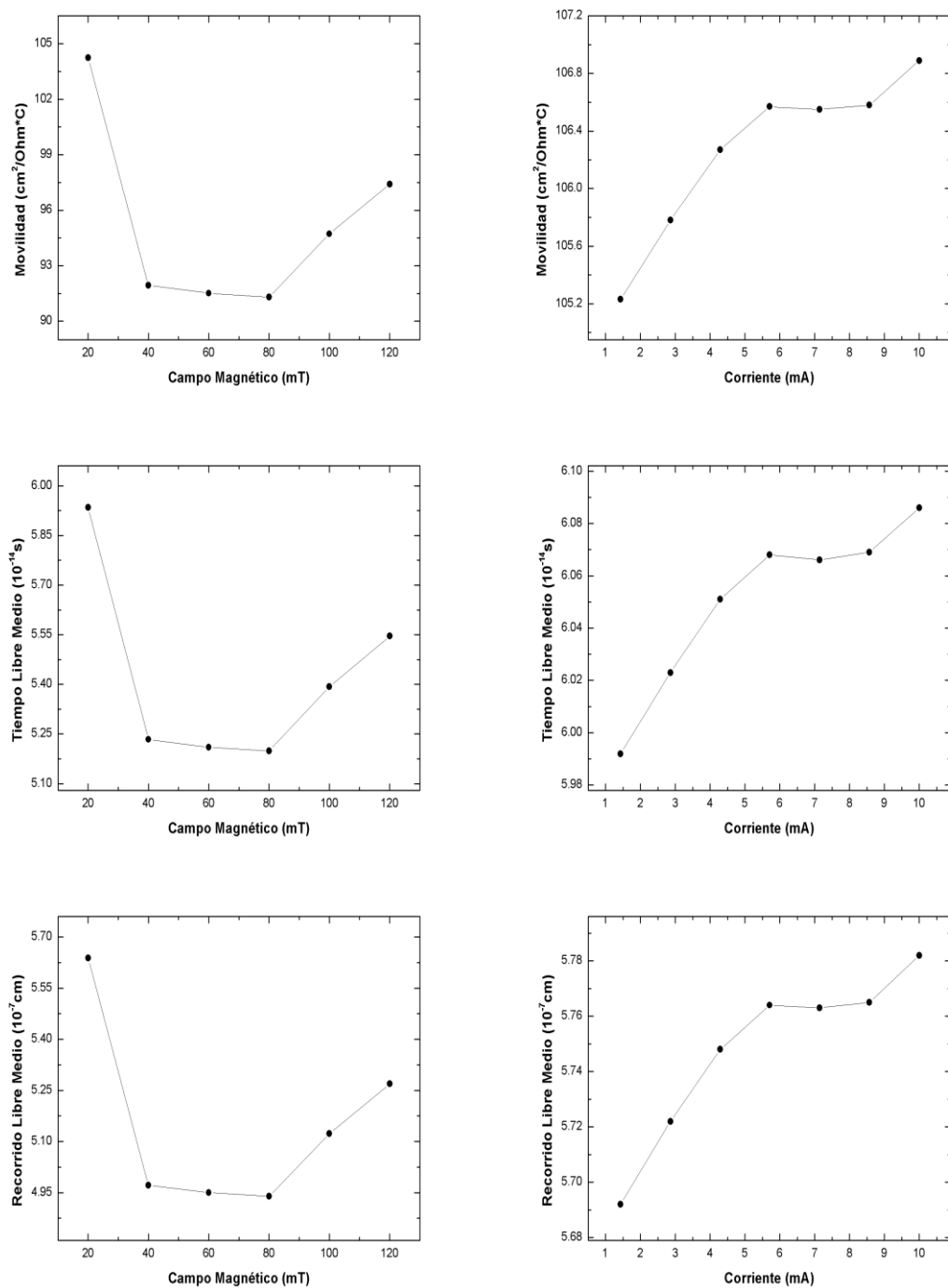


Figura 3.22. Gráficos de los Resultados de Movilidad, de Tiempo Libre Medio, y de Recorrido Libre Medio para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$.

Comparando los resultados de concentración de portadores de las dos cintas magnéticas estudiadas, se encuentra que la cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ presenta un valor de densidad de portadores considerablemente mayor al obtenido para la cinta de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$ (ambas del orden de 10^{20} cm^{-3}). Esto indica claramente que las cintas con contenido de Silicio (Si) poseen una densidad menor a aquellas cintas que no lo contengan, siendo estas últimas mejores conductoras eléctricas. En la figura 3.23 se muestra una comparación entre las densidades de estas cintas en función de la corriente y en función del campo.

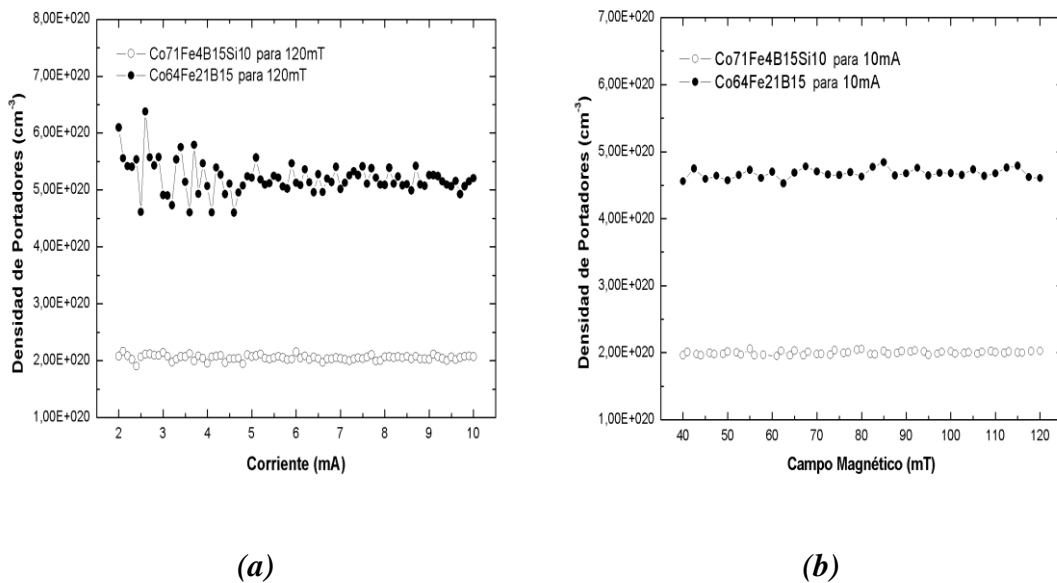


Figura 3.23. Densidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético para las Cintas de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ y $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$: (a) Densidad vs Corriente para un campo de 120 mT, (b) Densidad vs Campo para una corriente 10 mA.

3.3.2.2 Medidas sobre $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ mediante la Técnica Hall de Van Der Pauw

Sobre esta cinta también se realizaron medidas por medio del sistema de Van Der Pauw, lo cual se hizo para verificar o corregir los resultados obtenidos por medio de la técnica de Cuatro Puntas y para conocer su resistividad. Primero se realizaron una serie de

medidas con el sistema de medidas de resistividad; los resultados de estas pruebas son mostrados en la tabla 3.11, en donde R_s es la resistencia superficial y ρ la resistividad.

No	R_s (Ω)	ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)
1	0.0664820	1.32964E-4
2	0.0667462	1.33492E-4
3	0.0602053	1.20411E-4
4	0.0620718	1.24144E-4
5	0.0593085	1.18617E-4
6	0.0518845	1.03769E-4
7	0.0672515	1.34503E-4
8	0.0674920	1.34984E-4
9	0.0547173	1.09435E-4
10	0.0696395	1.39279E-4
Promedio	0.0625800	1.25160E-4
Desviación	± 0.0059700	$\pm 0.11948\text{E-}4$

Tabla 3.11. Resultados de Resistencia Superficial y de Resistividad para la Cinta Magnética de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$.

En esta tabla (tabla 3.11) se puede ver una resistencia superficial de $0.063 \pm 0.006 \Omega$ la cual esta de acorde a su resistencia, que es de 0.640Ω . El valor obtenido de resistividad de $(1.25 \pm 0.12) \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ para esta cinta magnética, es característico de materiales intermedios entre metales y semiconductores, el cual es un poco mayor a la registrada para materiales como los metales ($10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$) [45,46].

Luego se hicieron medidas de efecto Hall sobre esta cinta, con dicha técnica, en donde se obtuvo la densidad de portadores del material en función de la corriente para un campo de 120 mT y en función del campo magnético para una corriente de 10 mA, y cuyas gráficas son mostradas en las figuras 3.24 y 3.25 respectivamente. En estas gráficas de densidad se puede ver nuevamente un aumento en la dispersión de los puntos con la disminución de la corriente y del campo aplicados.

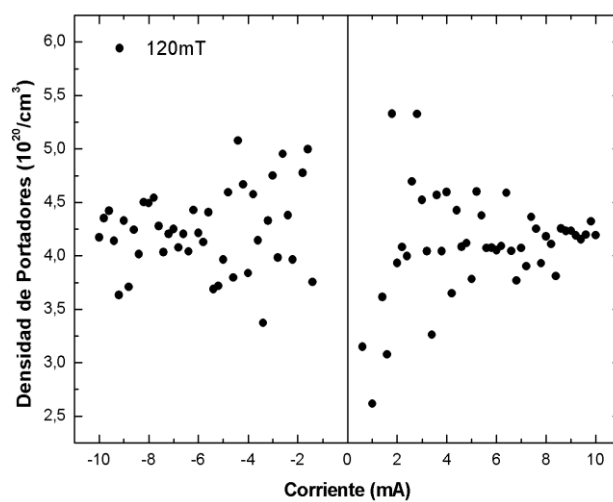


Figura 3.24. Densidad de Portadores en función de la Corriente para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ (Técnica de Van Der Pauw).

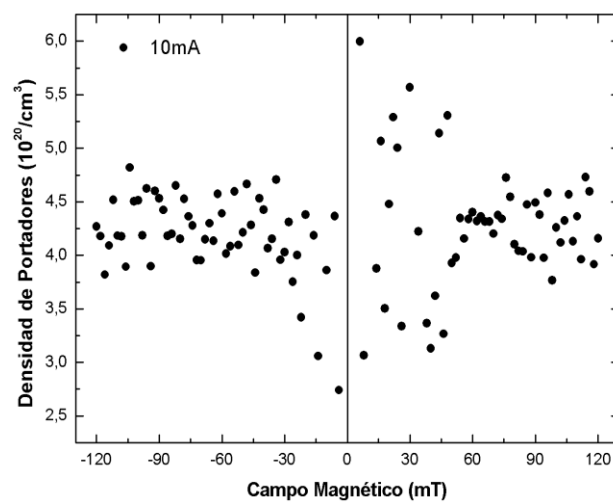


Figura 3.25. Densidad de Portadores en función del Campo Magnético para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ (Técnica de Van Der Pauw).

Sin embargo el grado de dispersión de medidas es mucho menor a la vista para el cobre, con un valor más estable de densidad, la cual es de $(4.198 \pm 0.346) \times 10^{20}$ portadores/cm³ variando corriente y de $(4.237 \pm 0.351) \times 10^{20}$ portadores/cm³ variando campo. Este resultado de concentración de carga es muy similar al obtenido con la técnica de Cuatro Puntas (del orden de 10^{20} cm⁻³), lo cual confirma el carácter metálico-semiconductor de esta cinta de Co₆₄Fe₂₁B₁₅, en donde el Cobalto (Co) y el Hierro (Fe) aportan la parte metálica y el Boro (B) aporta semiconductora.

En la figura 3.26 se muestran los resultados de la movilidad de portadores de esta cinta en función de la corriente y del campo magnético. De estos gráficos se puede deducir un valor de movilidad de 99.02 ± 8.21 cm²/Ω·C y de 98.18 ± 8.67 variando corriente y campo respectivamente; este valor (mayor que la movilidad del cobre) es típico de materiales de buena conductividad [50,51].

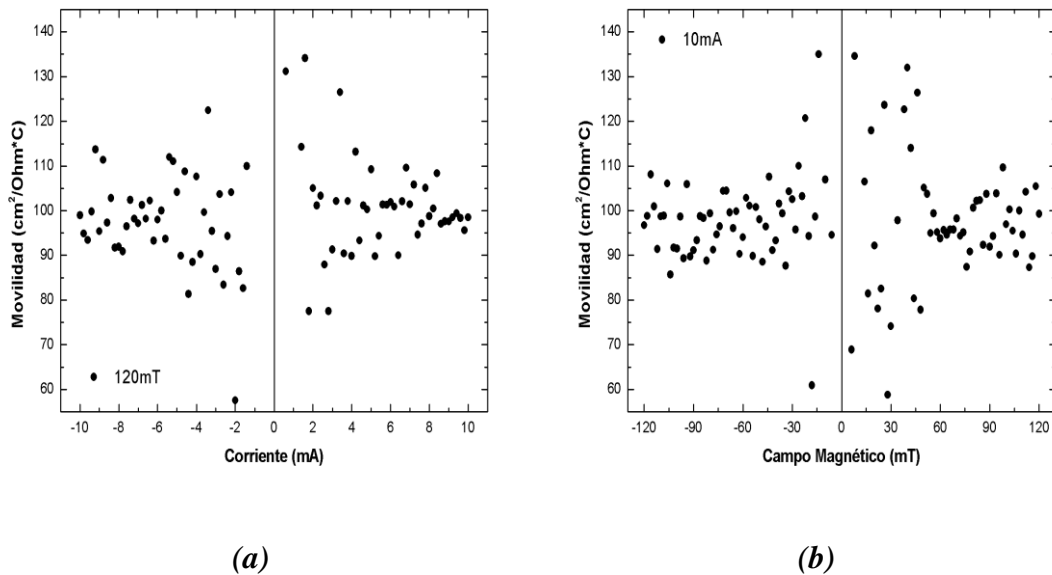


Figura 3.26. Movilidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta de Co₆₄Fe₂₁B₁₅: (a) Movilidad vs Corriente para 120 mT, (b) Movilidad vs Campo para 10 mA.

Los resultados de las medidas sobre esta cinta con las técnicas Hall DC de Cuatro Puntas y de Van Der Pauw presentan medidas muy similares, con un aumento en la dispersión de medidas al reducir la corriente y el campo aplicados a la muestra (medidas no confiables para baja corriente y bajo campo), y con una considerable estabilidad de medidas (densidad y movilidad de carga constante) para altas corrientes y altos campos (medidas confiables).

3.3.2.3 Medidas sobre $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ mediante la Técnica Hall AC

Se realizaron medidas de efecto Hall AC en esta cinta variando el campo magnético y la frecuencia de la corriente aplicada a la muestra de material. Antes de describir los detalles experimentales, cabe anotar que aunque la fuente AC de 0.1 A utilizada puede generar frecuencias de hasta 100 kHz, por cuestiones técnicas (límite de sincronización en modo AC), el sistema en conjunto (Fuente AC – Nanovoltímetro) solo puede trabajar confiablemente a frecuencias menores a 1Hz para ondas de tipo senoidal.

Inicialmente se llevaron a cabo medidas de la amplitud y de fase del voltaje Hall AC sobre esta cinta en función del campo magnético, entre -120 y 120 mT con un paso de 2mT, para diferentes valores de frecuencia (menores a 1Hz) de corriente alterna aplicada, con una amplitud de 10 mA. En las figuras 3.27(a) y 3.27(b) se presentan los gráficos de amplitud Hall versus campo y de fase Hall versus campo respectivamente.

Los resultados de amplitud Hall para la cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ (figura 3.27(a)) muestran voltajes medidos del orden de 10^{-7} V, estos resultados son bastante similares a los obtenidos por medio de las técnicas DC (Cuatro Puntas y Van Der Pauw) para una corriente directa de 10 mA y para el mismo intervalo de campo magnético; y debido a que los puntos medidos tienen una misma tendencia lineal, se puede decir que el valor de la frecuencia (257, 505 y 1000 mHz) de la corriente aplicada no modifica de manera considerable las medidas de voltaje. En la gráfica de fase hall versus campo magnético (figura 3.27(b)) se puede ver, aunque con un grado de dispersión considerable, (± 4

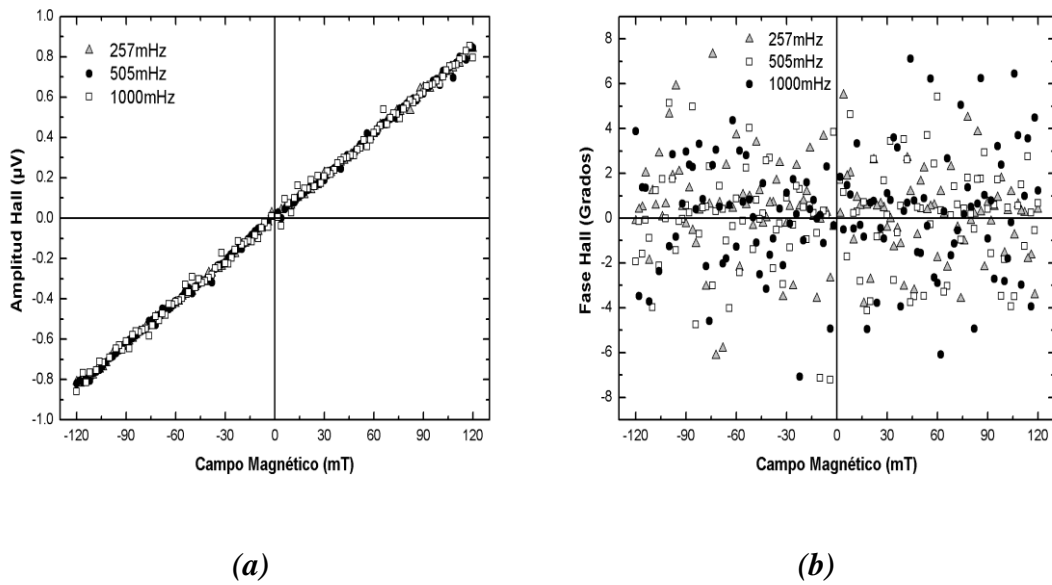


Figura 3.27. Amplitud y Fase del Voltaje Hall AC en función del Campo Magnético para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$: (a) Amplitud vs Campo para varias frecuencias constantes, (b) Fase vs Campo para varias frecuencias constantes.

grados de desviación), una tendencia de los puntos a una fase de 0 grados, independiente de la frecuencia de la corriente, esto indica que el campo magnético no causa una fase Hall apreciable (con el sistema actual) para frecuencias menores a 1 Hz.

En las figuras 3.28(a) y 3.28(b) se muestran los gráficos de amplitud Hall y de fase Hall en función de la frecuencia respectivamente, para un rango de frecuencias entre 1 y 1000 mHz con una amplitud de 10 mA de corriente, y para varios campos magnéticos constantes (20, 60 y 120 mT).

En el gráfico de amplitud Hall versus frecuencia (ver figura 3.28(a)) se puede observar una tendencia aproximadamente constante de los puntos medidos de voltaje (del orden de los microvoltios) con la frecuencia de la corriente aplicada (el voltaje casi no varía con la frecuencia), también se puede ver un aumento de este valor constante de amplitud

de voltaje con el aumento del campo magnético aplicado, o dicho de otra forma, hay una relación directamente proporcional del voltaje con el campo. Estos resultados de amplitud están en concordancia con los valores de voltaje Hall medidos con los sistemas DC para una corriente de 10 mA y para los mismos valores de campo magnético.

En el gráfico de fase Hall en función de la frecuencia (figura 3.28(b)) se puede ver (igual que en fase vs campo) medidas de fase alrededor de los 0 Grados, aunque con una relativa dispersión de medidas (± 5 grados de desviación), esto es, no hay una fase Hall observable (con la resolución del sistema construido) con la variación de la frecuencia de corriente, y tampoco hay fase con el cambio de campo magnético.

A partir de estas medidas Hall AC, obtenidas variando el campo magnético y la frecuencia, se determina la concentración de portadores de la cinta. En la figura 3.29 se

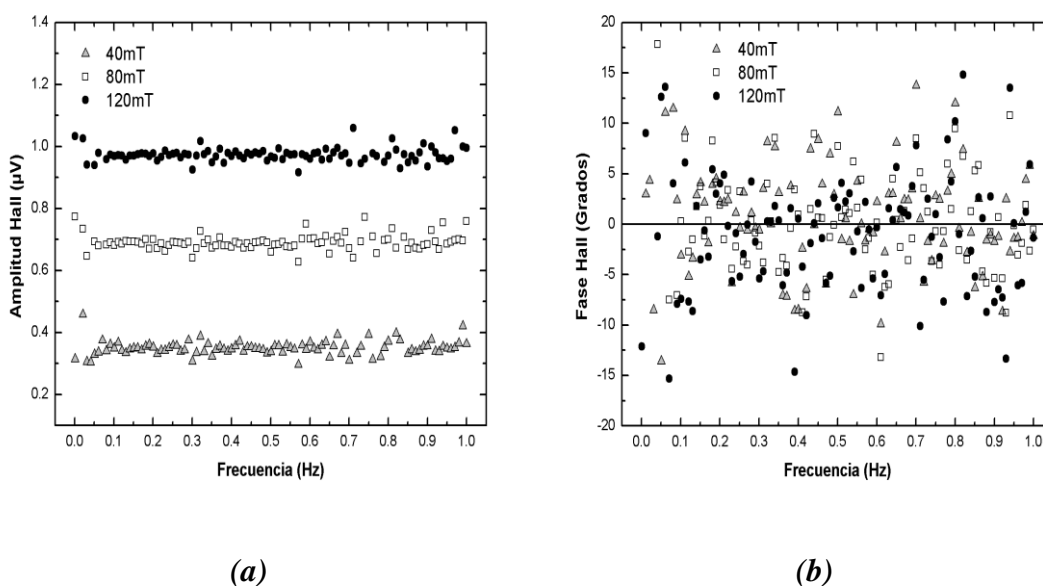


Figura 3.28. Amplitud y Fase del Voltaje Hall AC en función de la Frecuencia para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$: (a) Amplitud vs Frecuencia para varios campos constantes, (b) Fase vs Frecuencia para varios campos constantes.

presentan los gráficos de densidad de portadores en función del campo magnético para varias frecuencias constantes, y en función de la frecuencia para varios campos constantes. Estos gráficos de densidad muestran, en general, una disminución en la dispersión de medidas con el aumento del campo, y una independencia considerable de los datos medidos con la frecuencia de la corriente aplicada. A partir de estos gráficos se pueden hallar los valores de densidad de carga (10^{20} cm^{-3}) y de coeficiente Hall ($10^{-2} \text{ cm}^3/\text{C}$) variando campo magnético y frecuencia para todas las frecuencias y campos constantes aplicados, los cuales se muestran en las tablas 3.12(a) y 3.12(b); y los resultados de movilidad, de tiempo libre medio (10^{-14} s), y de recorrido libre medio (10^{-7} cm), calculados mediante estos valores de densidad y la resistencia superficial hallada anteriormente, se presentan en las tablas 3.13(a) y 3.13(b).

En resumen, se puede decir que los resultados de las medidas realizadas con la técnica Hall AC de baja frecuencia sobre la cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ muestran una fase Hall

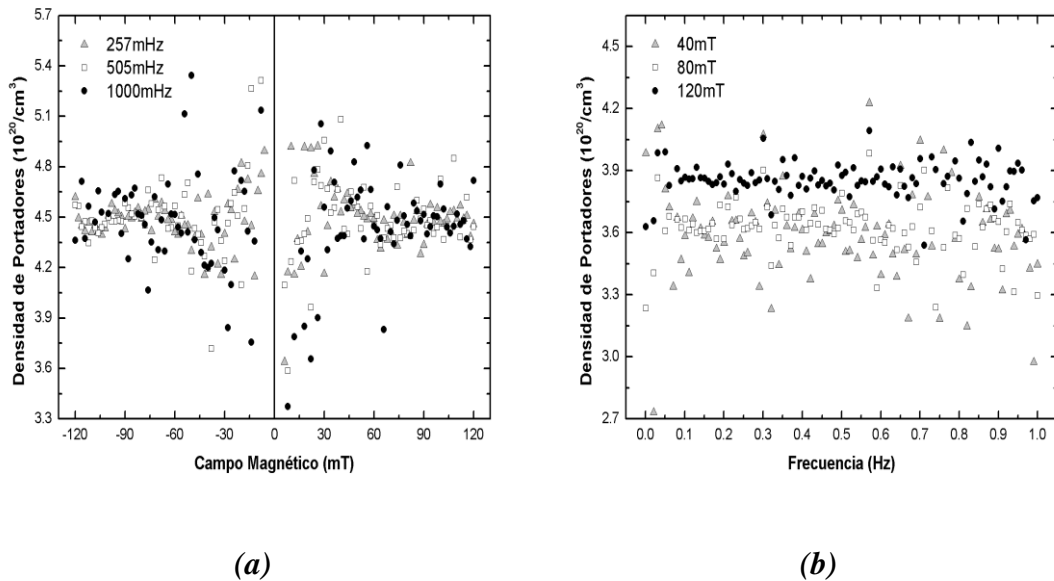


Figura 3.29. Densidad de Portadores en función del Campo Magnético y de la Frecuencia para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$: (a) Densidad vs Campo para varias frecuencias constantes, (b) Densidad vs Frecuencia para varios campos constantes.

Variando Campo	Densidad de Portadores (10^{20} cm^{-3})	Coefficiente Hall ($10^{-2} \text{ cm}^3/\text{C}$)
para 257 mHz	4.485 ± 0.101	1.394 ± 0.032
para 505 mHz	4.480 ± 0.158	1.395 ± 0.051
para 1000 mHz	4.506 ± 0.206	1.387 ± 0.067

(a)

Variando Frecuencia	Densidad de Portadores (10^{20} cm^{-3})	Coefficiente Hall ($10^{-2} \text{ cm}^3/\text{C}$)
para 40 mT	3.595 ± 0.228	1.739 ± 0.118
para 80 mT	3.624 ± 0.127	1.725 ± 0.063
para 120 mT	3.854 ± 0.090	1.622 ± 0.039

(b)

Tabla 3.12. Resultados de Densidad de Portadores y de Coeficiente Hall para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$: (a) Resultados variando Campo, b) Resultados variando Frecuencia.

Variando Campo	Movilidad ($\text{cm}^2/\Omega \cdot \text{C}$)	Tiempo Libre Medio (10^{-14} s)	Recorrido Libre Medio (10^{-7} cm)
para 257 mHz	111.34 ± 2.58	6.340 ± 0.147	6.023 ± 0.139
para 505 mHz	111.47 ± 4.07	6.347 ± 0.232	6.029 ± 0.220
para 1000 mHz	110.83 ± 5.32	6.311 ± 0.303	5.995 ± 0.288

(a)

Variando Frecuencia	Movilidad ($\text{cm}^2/\Omega \cdot \text{C}$)	Tiempo Libre Medio (10^{-14} s)	Recorrido Libre Medio (10^{-7} cm)
para 40 mT	138.92 ± 9.41	7.910 ± 0.536	7.514 ± 0.509
para 80 mT	137.79 ± 5.01	7.845 ± 0.285	7.453 ± 0.271
para 120 mT	129.56 ± 3.09	7.377 ± 0.176	7.008 ± 0.167

(b)

Tabla 3.13. Resultados de Movilidad, de Tiempo Libre Medio, y de Recorrido Libre Medio para la Cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$: (a) Resultados variando Campo, b) Resultados variando Frecuencia.

próxima a 0 grados, y con una densidad de portadores (del orden de 10^{20} cm^{-3}) y una movilidad muy similares a las obtenidas por medio de los sistemas Hall DC.

3.4 Medidas de magnetotransporte y magnéticas en Cintas tipo Finemet

Se realizaron medidas de efecto Hall DC y AC, Magnetización DC, y de Susceptibilidad AC a temperatura ambiente sobre cintas tipo Finemet $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$, producidas mediante la técnica de *Melt Spinning* para conocer sus características eléctricas y magnéticas. Estas cintas fueron donadas por la Doctora Josefina Silveyra de la Universidad de Buenos Aires, y se caracterizan por tener ciclos de histéresis estrechos, alta permeabilidad magnética, y ser buenos conductores eléctricos, además su estado estructural es amorfo [54].

Las anteriores cintas fueron preparadas en forma rectangular con 2 cm de largo por 1 cm de ancho para las medidas de efecto Hall, y se contactaron a un portamuestra o circuito impreso por presión, como se mencionó en la sección anterior. El espesor de estas cintas es de $15 \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$ medido con un calibrador digital [53], el cual es típico para este tipo de materiales producidos por la técnica de *Melt Spinning*.

3.4.1 Caracterización eléctrica de $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ por medio de las Técnicas Hall DC

La caracterización eléctrica de estas cintas a temperatura ambiente se realizó usando efecto Hall en configuración de cuatro puntas y la técnica de Van Der Pauw. Inicialmente, se realizaron medidas de voltaje Hall sobre las muestras variando la corriente entre -20 y 20 mA, para campos magnéticos constantes de 200, 400, 600 y 800 mT. Luego, se realizaron medidas de voltaje Hall variando el campo magnético entre -800 y 800 mT, con corrientes constantes de 5, 10, 15 y 20 mA. Los resultados de voltaje Hall, en función de la corriente y en función del campo magnético, para las cintas son mostrados en las figuras 3.30, 3.31, 3.32 y 3.33 respectivamente.

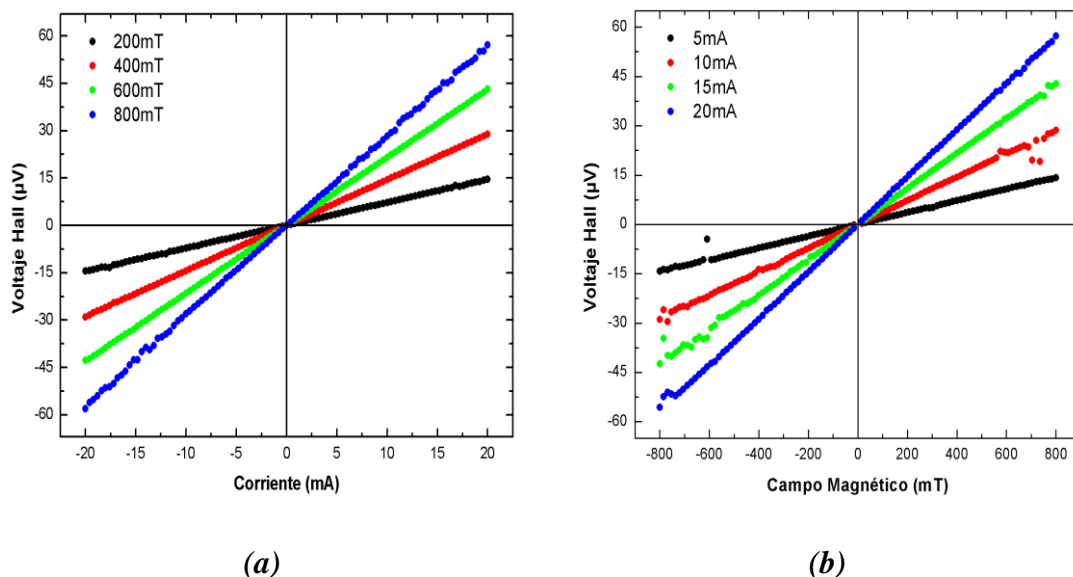


Figura 3.30. Voltaje Hall en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet Nb_3Mo_0 : (a) Voltaje Hall vs Corriente para varios campos constantes, (b) Voltaje Hall vs Campo para varias corrientes constantes.

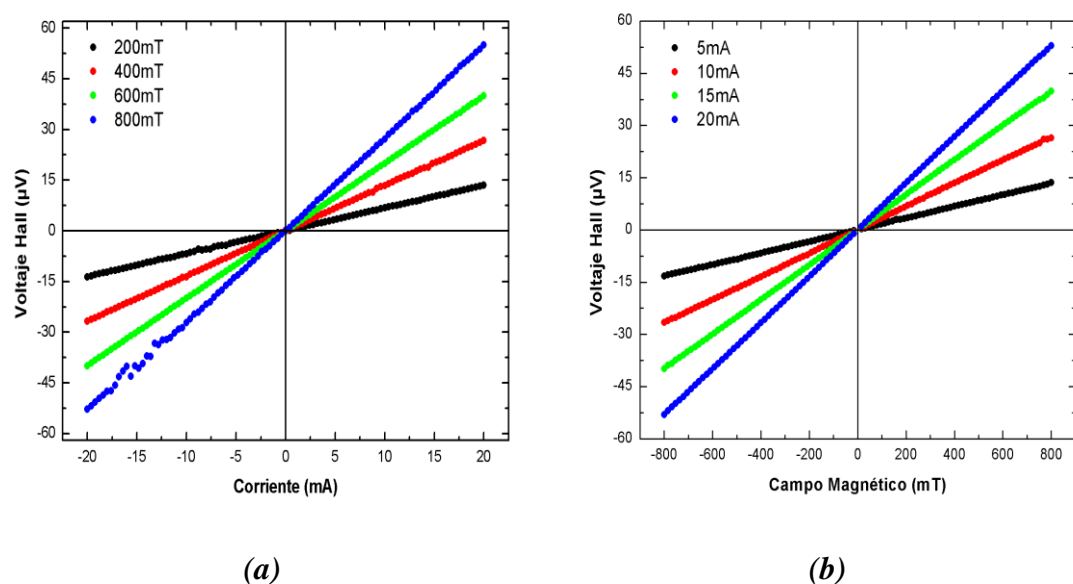


Figura 3.31. Voltaje Hall en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet Nb_1Mo_2 : (a) Voltaje Hall vs Corriente para varios campos constantes, (b) Voltaje Hall vs Campo para varias corrientes constantes.

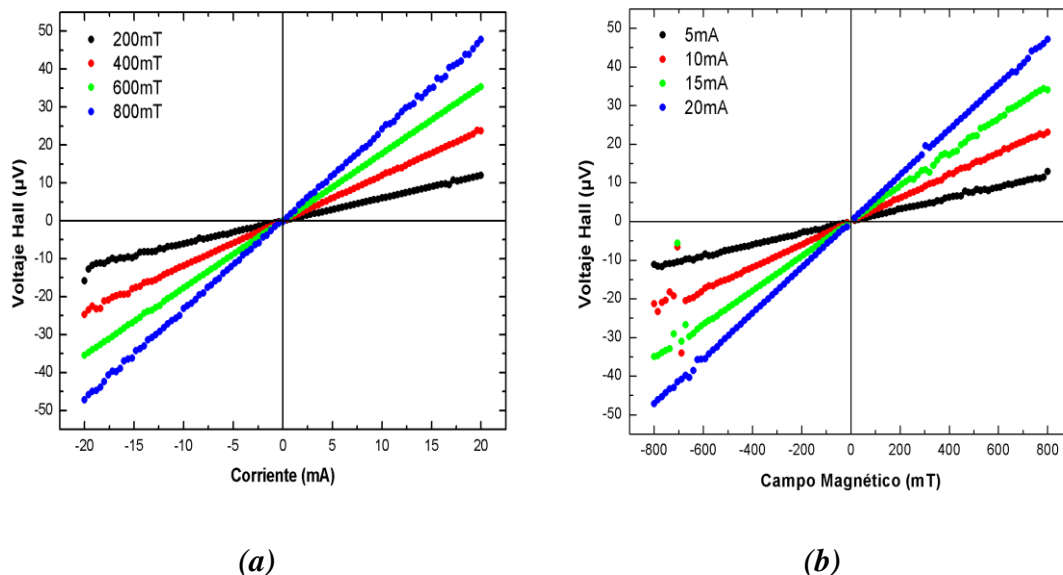


Figura 3.32. Voltaje Hall en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet Nb_0Mo_3 : (a) Voltaje Hall vs Corriente para varios campos constantes, (b) Voltaje Hall vs Campo para varias corrientes constantes.

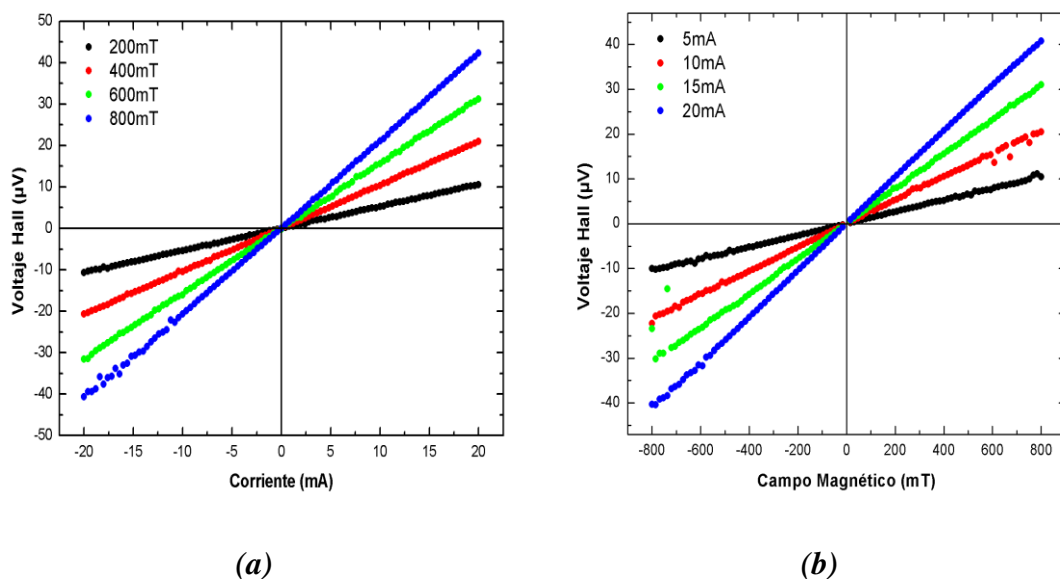


Figura 3.33. Voltaje Hall en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet $\text{Nb}_{1.5}\text{Mo}_{1.5}$: (a) Voltaje Hall vs Corriente para varios campos constantes, (b) Voltaje Hall vs Campo para varias corrientes constantes.

Todas estas gráficas (figuras 3.30 a la 3.33) muestran una relación directamente proporcional (tendencia lineal) del voltaje Hall con la corriente y con el campo magnético, con voltajes medidos del orden de los microvoltios. En las gráficas de voltaje Hall en función de la corriente se puede ver un aumento de la pendiente de la recta con el incremento del campo, y en la de voltaje Hall versus campo se ve un aumento de la pendiente a medida que se incrementa la corriente aplicada. La pendiente positiva de todas estas rectas indica que los portadores de carga de las cintas son electrones de carga “positiva” (electrones ocupando orbitales cerca del máximo de la banda), siendo el Hierro (Fe) y el Silicio (Si) los principales responsables de este tipo de portador [55].

A partir de estos resultados de voltaje Hall se construyeron las gráficas de densidad de portadores en función de la corriente y en función del campo para las cuatro cintas magnéticas, las cuales se pueden observar en las figuras 3.34, 3.35, 3.36 y 3.37.

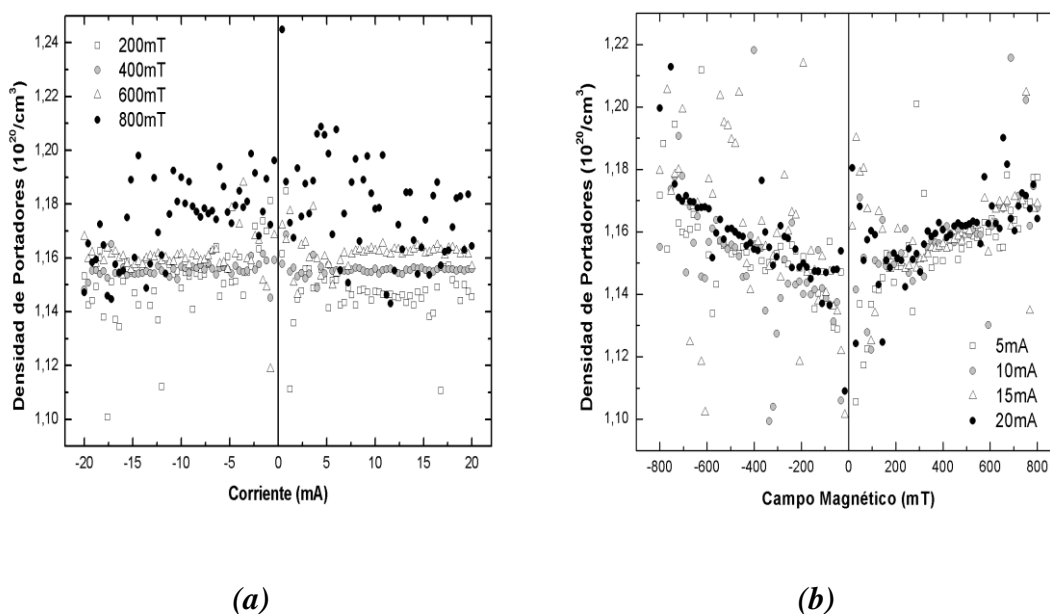
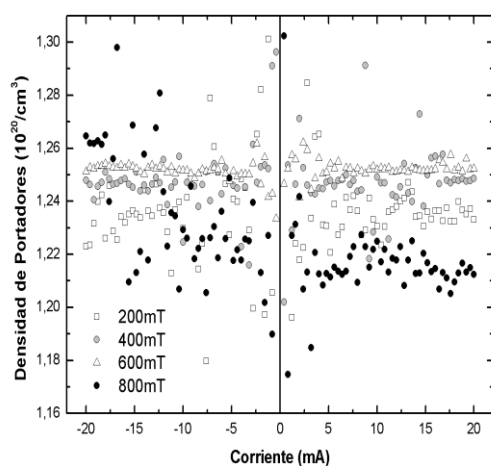
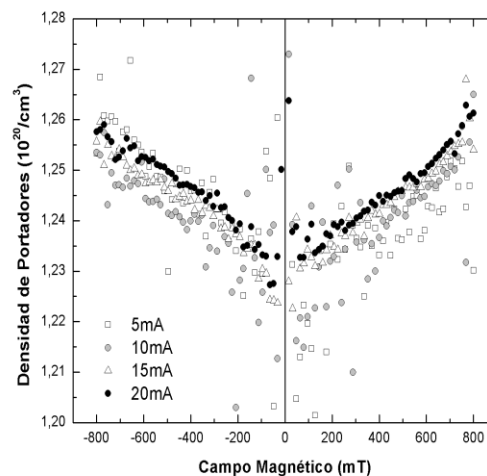


Figura 3.34. Densidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet Nb_3Mo_7 : (a) Densidad vs Corriente para varios campos constantes, (b) Densidad vs Campo para varias corrientes constantes.

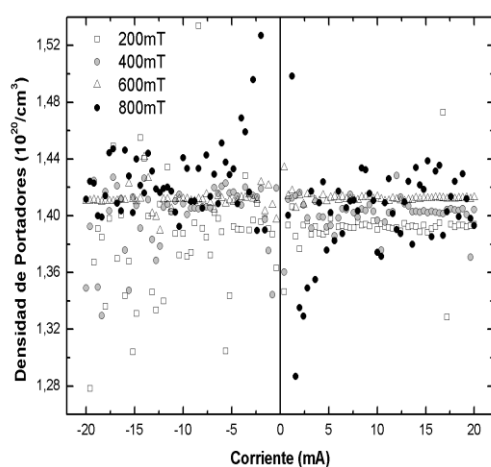


(a)

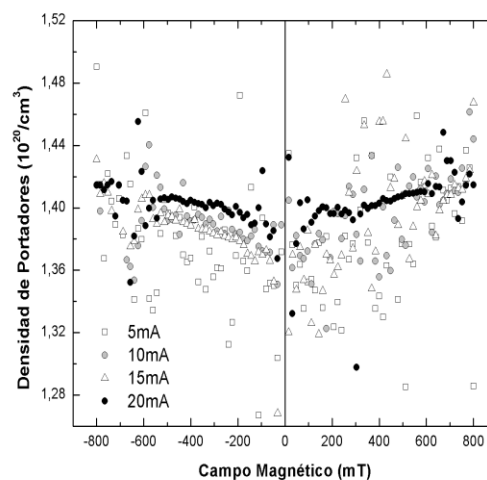


(b)

Figura 3.35. Densidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet Nb_1Mo_2 : (a) Densidad vs Corriente para varios campos constantes, (b) Densidad vs Campo para varias corrientes constantes.



(a)



(b)

Figura 3.36. Densidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet Nb_0Mo_3 : (a) Densidad vs Corriente para varios campos constantes, (b) Densidad vs Campo para varias corrientes constantes.

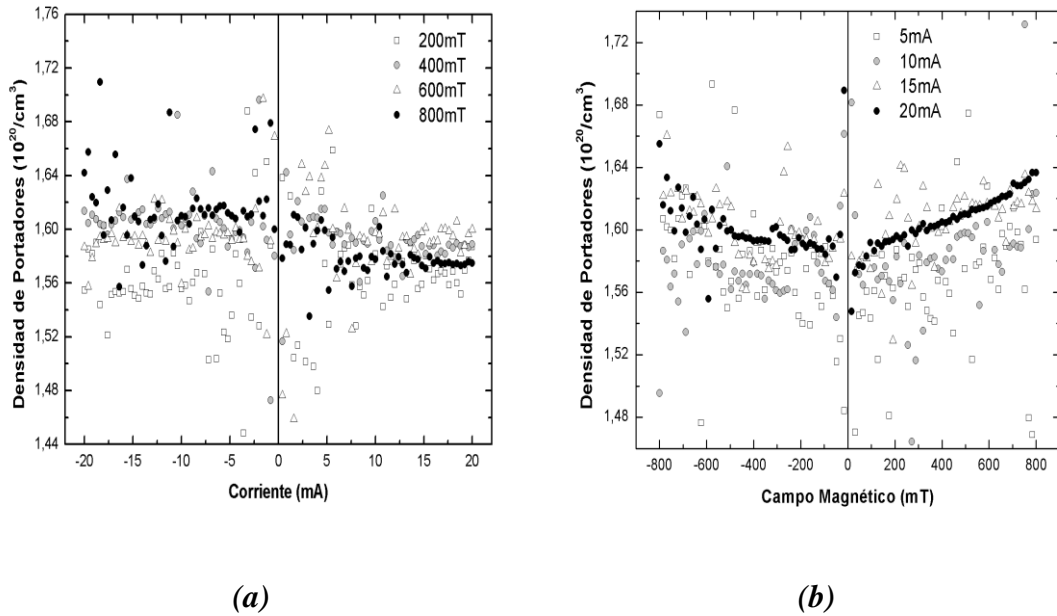


Figura 3.37. Densidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet $\text{Nb}_{1.5}\text{Mo}_{1.5}$: (a) Densidad vs Corriente para varios campos constantes, (b) Densidad vs Campo para varias corrientes constantes.

Todas las anteriores gráficas (figuras 3.34 a la 3.37) de densidad de portadores presentan un comportamiento casi independiente con la corriente y con el campo aplicados (ver variación en la escala de densidad), sin embargo se puede apreciar un leve incremento en la densidad con el aumento del campo magnético aplicado a la muestra (ver gráficas en función de campo), esto podría deberse a que mientras más campo exista, más será la fuerza que actuara para desviar a los portadores de carga a los extremos del material, y así el sistema de efecto Hall podrá medir una mayor densidad, hasta llegar al límite de la concentración intrínseca de portadores de carga de la muestra estudiada. También se puede ver en todas estas gráficas una concentración de portadores del orden de 10^{20} portadores/ cm^3 para todas las cuatro cintas magnéticas ($\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$), este orden ubica a estas cintas entre los materiales metálicos y los semiconductores [15,49], y como es un valor considerablemente grande, se puede decir

que estas cintas son buenas conductoras eléctricas. El carácter metálico de estas cintas es aportado en su mayor parte por el Hierro, mientras que el carácter semiconductor lo dan el Silicio y el Boro (B).

En la figura 3.38 se presenta una comparación de las densidades de carga para las cuatro cintas estudiadas, tanto en función de corriente como en función de campo. En estas gráficas se puede ver un aumento en la densidad de portadores a medida que aumenta la concentración de Molibdeno (Mo) y disminuye la concentración de Niobio (Nb), con excepción en el caso en el cual la concentración de Molibdeno y Niobio son iguales, caso en el que se obtiene el mayor valor de densidad, siendo este último el mejor conductor eléctrico de las cuatro cintas.

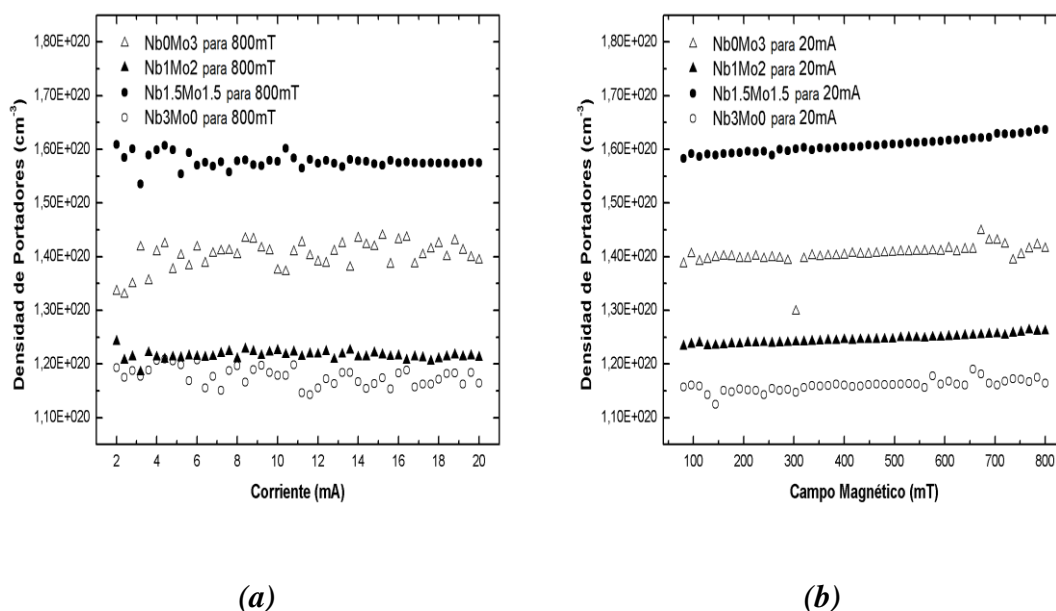


Figura 3.38. Densidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético de las Cintas $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_{3-x}Mo_xCu_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$: (a) Densidad vs Corriente para un campo de 800 mT, (b) Densidad vs Campo para una corriente 20 mA.

A partir de estos resultados de densidad se pueden calcular los valores de densidad de carga promedio para cada cinta y el coeficiente Hall correspondiente, estos valores se muestran en las tablas 3.14(a) y 3.14(b) variando corriente y campo para todos los campos y corrientes constantes respectivamente, ambas tablas muestran valores muy similares. En la figura 3.39 se presentan los gráficos de densidad y de coeficiente Hall contruïdos a partir de estas tablas. Como se puede ver en estos resultados el coeficiente Hall es inversamente proporcional a la densidad (ver ecuaciones (21) y (23)) y del orden de $10^{-2} \text{ cm}^3/\text{C}$ (entre metales y semiconductores), y su signo positivo indica a los electrones de carga “positiva” como portadores de carga del material.

En estas cuatro cintas tipo Finemet (para $x = 0, 1.5, 2, 3$) también se llevaron a cabo medidas de resistividad con el sistema de Van Der Pauw. Los resultados promedios de resistencia superficial y de resistividad para las cintas son mostrados en la tabla 3.15.

Los valores de resistencia superficial ($10^{-2} \Omega$) que se observan en esta tabla (tabla 3.15) son esperados para estos materiales de baja resistencia, mientras que los valores obtenidos de resistividad ($10^{-4} \Omega\cdot\text{cm}$) son característicos de materiales de buena conductividad, y se acercan a la resistividad registrada para los metales ($10^{-6} \Omega\cdot\text{cm}$) [45,46], y los valores de resistividad según la concentración de Niobio y Molibdeno concuerdan con la densidad de carga (a mayor densidad menor resistividad) obtenida anteriormente para estos materiales.

Para verificar el funcionamiento del sistema se compararon las medidas de resistividad con los resultados obtenidos en la Universidad de Buenos Aires por la Dr. Josefina Silveyra [54], y cuyos resultados son mostrados en la tabla 3.16. Estos resultados de resistividad concuerdan en orden de magnitud con los ya presentados ($10^{-4} \Omega\cdot\text{cm}$), con valores muy similares.

Densidad de Portadores (10^{20} cm^{-3})	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb0Mo3	Nb1.5Mo1.5
para 200 mT	1.148±0.010	1.237±0.021	1.385±0.047	1.565±0.050
para 400 mT	1.155±0.002	1.247±0.010	1.402±0.017	1.598±0.014
para 600 mT	1.162±0.005	1.252±0.003	1.412±0.005	1.595±0.020
para 800 mT	1.175±0.016	1.230±0.028	1.415±0.028	1.597±0.028

Coeficiente Hall ($10^{-2} \text{ cm}^3/\text{C}$)	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb0Mo3	Nb1.5Mo1.5
para 200 mT	5.442±0.048	5.053±0.085	4.514±0.160	3.995±0.132
para 400 mT	5.410±0.010	5.013±0.039	4.457±0.055	3.911±0.035
para 600 mT	5.381±0.024	4.991±0.011	4.427±0.016	3.918±0.049
para 800 mT	5.319±0.073	5.081±0.116	4.418±0.091	3.914±0.071

(a)

Densidad de Portadores (10^{20} cm^{-3})	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb0Mo3	Nb1.5Mo1.5
para 5 mA	1.158±0.017	1.242±0.013	1.375±0.049	1.577±0.038
para 10 mA	1.158±0.043	1.241±0.011	1.403±0.049	1.578±0.049
para 15 mA	1.165±0.033	1.244±0.008	1.400±0.042	1.605±0.022
para 20 mA	1.162±0.018	1.246±0.008	1.403±0.017	1.604±0.015

Coeficiente Hall ($10^{-2} \text{ cm}^3/\text{C}$)	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb0Mo3	Nb1.5Mo1.5
para 5 mA	5.399±0.079	5.034±0.054	4.544±0.167	3.962±0.098
para 10 mA	5.396±0.210	5.038±0.044	4.453±0.160	3.960±0.127
para 15 mA	5.367±0.158	5.024±0.032	4.464±0.139	3.895±0.053
para 20 mA	5.378±0.085	5.014±0.031	4.454±0.054	3.897±0.037

(b)

Tabla 3.14. Resultados de Densidad de Portadores y de Coeficiente Hall para las Cintas de $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$: **(a)** Resultados variando Corriente, **(b)** Resultados variando Campo.

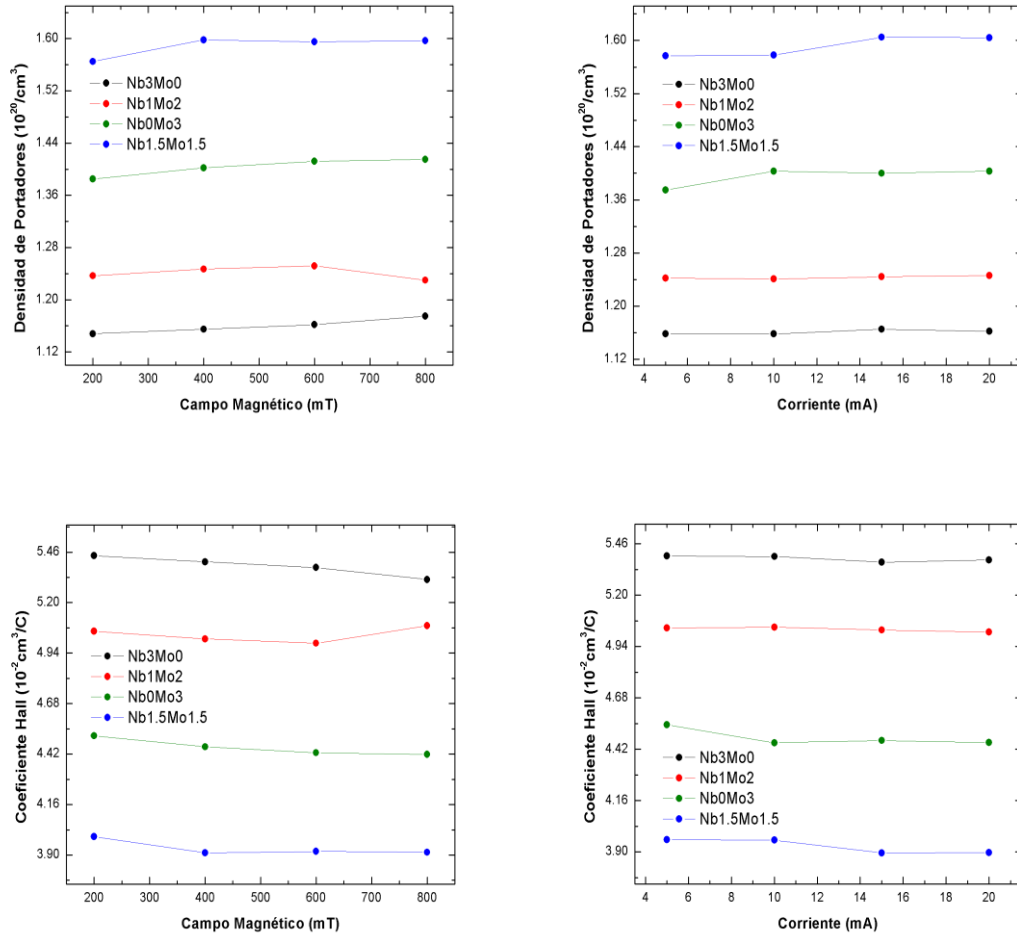


Figura 3.39. Gráficos de los Resultados de Densidad de Portadores y de Coeficiente Hall para las Cintas de $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$.

Parámetros	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb0Mo3	Nb1.5Mo1.5
Resistencia Superficial ($10^{-2} \Omega$)	10.20 ± 0.17	9.14 ± 0.17	7.92 ± 0.25	7.05 ± 0.10
Resistividad ($10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$)	1.531 ± 0.026	1.370 ± 0.025	1.189 ± 0.037	1.057 ± 0.016

Tabla 3.15. Resultados de Resistencia Superficial y Resistividad de las Cintas de $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$.

Parámetros	Nb3Mo0	Nb1.5Mo1.5	Nb1Mo2	Nb0Mo3
Resistividad ($10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$)	1.4909	1.47639	1.47168	1.46617
Error ($10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$)	± 3.16795	± 13.3376	± 6.02588	± 4.28072

Tabla 3.16. Resultados de Resistividad obtenidos en la Universidad de Buenos Aires de las Cintas $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$.

A partir de los resultados de voltaje Hall y de resistencia superficial se diseñaron las gráficas de movilidad de portadores en función de la corriente y en función del campo para las cuatro cintas, las cuales se pueden ver en las figuras 3.40, 3.41, 3.42 y 3.43.

Todas estas gráficas (figuras 3.40 a la 3.43) de movilidad de portadores muestran un comportamiento inverso al observado para la densidad, con medidas que casi no dependen de la corriente y del campo aplicados (ver escala de movilidad), y con una

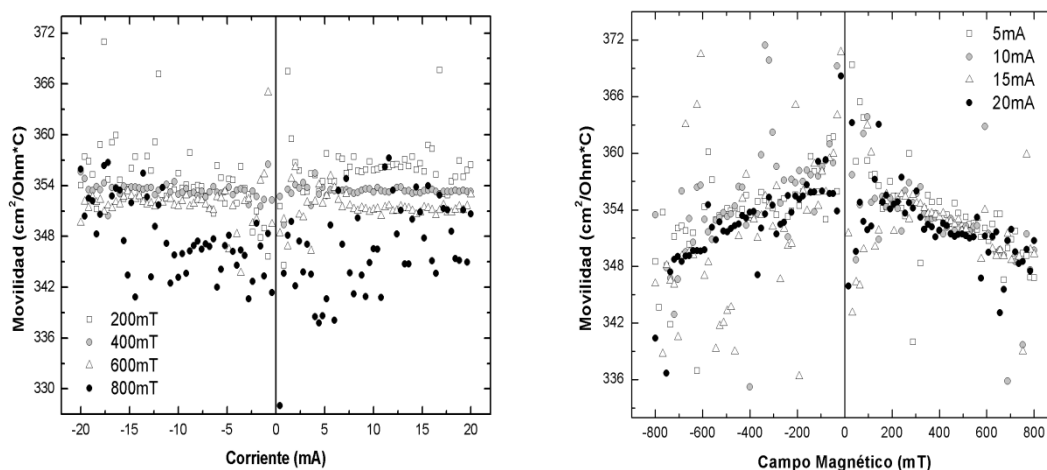


Figura 3.40. Movilidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet Nb_3Mo_0 : (a) Movilidad vs Corriente para varios campos constantes, (b) Movilidad vs Campo para varias corrientes constantes.

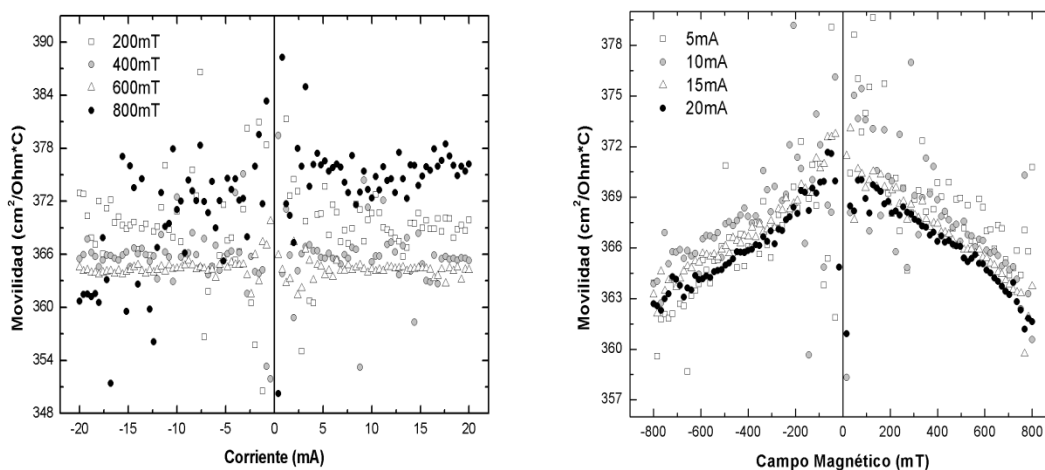


Figura 3.41. Movilidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet Nb₁Mo₂: (a) Movilidad vs Corriente para varios campos constantes, (b) Movilidad vs Campo para varias corrientes constantes.

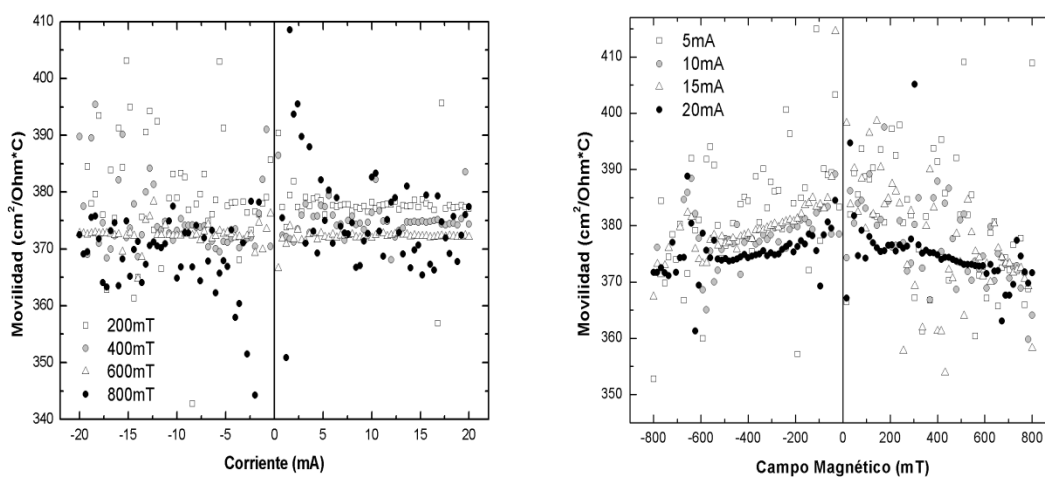


Figura 3.42. Movilidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet Nb₀Mo₃: (a) Movilidad vs Corriente para varios campos constantes, (b) Movilidad vs Campo para varias corrientes constantes.

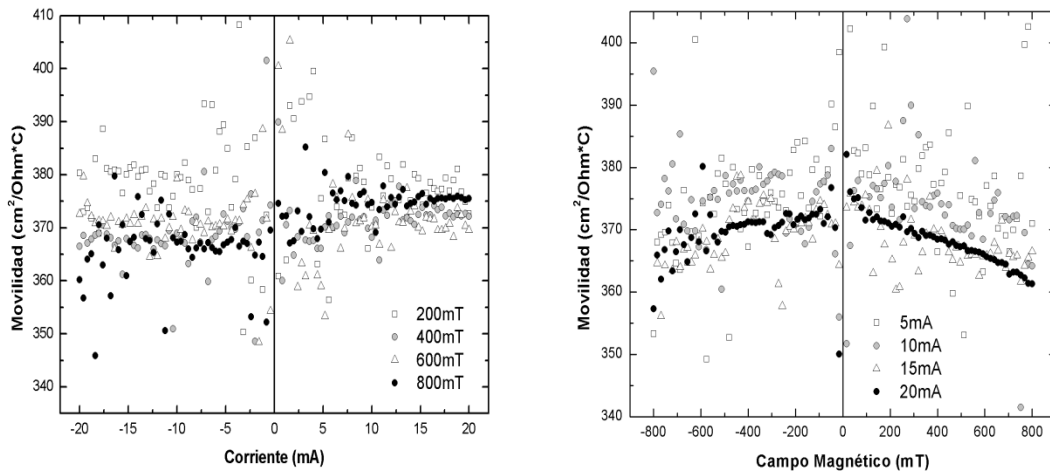


Figura 3.43. Movilidad de Portadores en función de la Corriente y del Campo Magnético para la Cinta Finemet Nb_{1.5}Mo_{1.5}: (a) Movilidad vs Corriente para varios campos constantes, (b) Movilidad vs Campo para varias corrientes constantes.

leve disminución en la movilidad con el incremento del campo magnético aplicado a la muestra (ver gráficas en función de campo). Estos resultados de movilidad, del orden de $10^2 \text{ cm}^2/\Omega \cdot \text{C}$, muestran que estas cintas son buenas conductoras, pero no tan buenas como el cobre y la cinta de Co₆₄Fe₂₁B₁₅ (caracterizadas anteriormente), cuyos valores de movilidad fueron menores.

A partir de los resultados de densidad de carga y de resistencia superficial obtenidos para dichas cintas se calcularon los valores de movilidad, de tiempo libre medio y de recorrido libre medio (ver ecuaciones (57), (25) y (26)), estos valores son mostrados en las tablas 3.17(a) y 3.17(b) variando corriente y campo respectivamente para los campos y corrientes constantes trabajados, con valores muy parecidos para ambas tablas. En la figura 3.44 se presentan los gráficos de movilidad, de tiempo y recorrido libre medio contruidos a partir de estas tablas.

Movilidad ($\text{cm}^2/\Omega\cdot\text{C}$)	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb0Mo3	Nb1.5Mo1.5
para 200 mT	355.57 \pm 3.17	368.78 \pm 6.23	379.73 \pm 13.41	377.97 \pm 12.51
para 400 mT	353.44 \pm 0.63	365.83 \pm 2.85	374.91 \pm 4.62	370.04 \pm 3.29
para 600 mT	351.55 \pm 1.58	364.27 \pm 0.81	372.37 \pm 1.35	370.69 \pm 4.62
para 800 mT	347.47 \pm 4.81	371.01 \pm 7.98	371.83 \pm 7.47	370.42 \pm 6.48

Tiempo Libre Medio (10^{-13} s)	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb0Mo3	Nb1.5Mo1.5
para 200 mT	2.025 \pm 0.018	2.100 \pm 0.035	2.162 \pm 0.076	2.152 \pm 0.071
para 400 mT	2.012 \pm 0.004	2.083 \pm 0.016	2.135 \pm 0.026	2.107 \pm 0.019
para 600 mT	2.002 \pm 0.009	2.074 \pm 0.005	2.120 \pm 0.008	2.111 \pm 0.026
para 800 mT	1.979 \pm 0.027	2.111 \pm 0.048	2.116 \pm 0.043	2.108 \pm 0.038

Recorrido Libre Medio (10^{-6} cm)	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb0Mo3	Nb1.5Mo1.5
para 200 mT	1.923 \pm 0.017	1.995 \pm 0.034	2.054 \pm 0.073	2.044 \pm 0.068
para 400 mT	1.912 \pm 0.003	1.979 \pm 0.015	2.028 \pm 0.025	2.002 \pm 0.018
para 600 mT	1.902 \pm 0.009	1.970 \pm 0.004	2.014 \pm 0.007	2.005 \pm 0.025
para 800 mT	1.880 \pm 0.026	2.006 \pm 0.046	2.010 \pm 0.041	2.003 \pm 0.036

(a)

Movilidad ($\text{cm}^2/\Omega\cdot\text{C}$)	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb0Mo3	Nb1.5Mo1.5
para 5 mA	352.76 \pm 5.13	367.39 \pm 3.95	382.26 \pm 14.01	374.91 \pm 9.31
para 10 mA	352.54 \pm 13.75	367.68 \pm 3.23	374.63 \pm 13.44	374.65 \pm 12.03
para 15 mA	350.62 \pm 10.33	366.64 \pm 2.31	375.49 \pm 11.66	368.54 \pm 5.02
para 20 mA	351.48 \pm 5.23	365.96 \pm 2.22	374.73 \pm 4.66	368.77 \pm 3.48

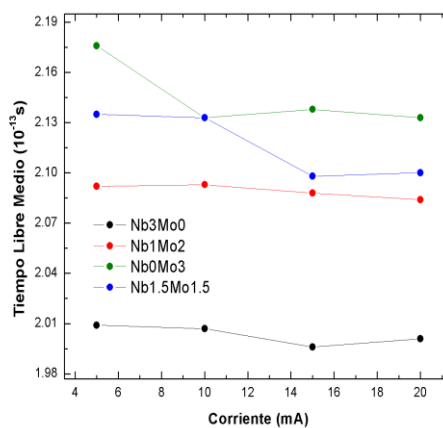
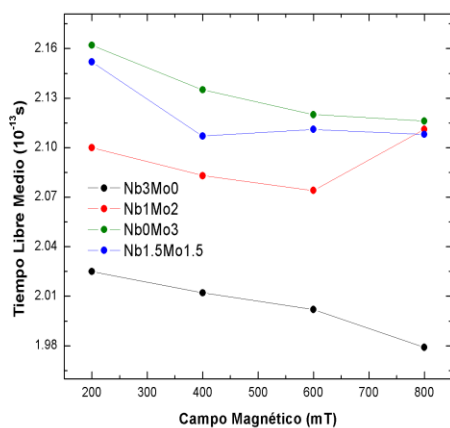
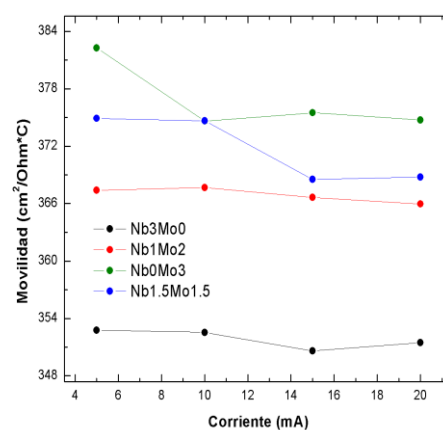
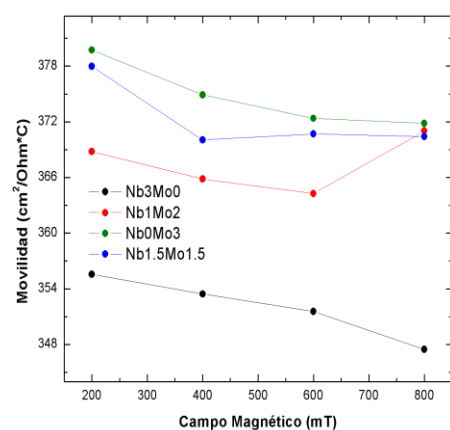
Tiempo Libre Medio (10^{-13} s)	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb0Mo3	Nb1.5Mo1.5
para 5 mA	2.009 \pm 0.029	2.092 \pm 0.022	2.176 \pm 0.080	2.135 \pm 0.053
para 10 mA	2.007 \pm 0.078	2.093 \pm 0.018	2.133 \pm 0.077	2.133 \pm 0.068
para 15 mA	1.996 \pm 0.059	2.088 \pm 0.013	2.138 \pm 0.066	2.098 \pm 0.029
para 20 mA	2.001 \pm 0.031	2.084 \pm 0.013	2.133 \pm 0.026	2.100 \pm 0.020

Recorrido Libre Medio (10^{-6} cm)	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb0Mo3	Nb1.5Mo1.5
para 5 mA	1.908 ± 0.028	1.987 ± 0.021	2.068 ± 0.076	2.028 ± 0.050
para 10 mA	1.907 ± 0.074	1.989 ± 0.017	2.026 ± 0.073	2.026 ± 0.065
para 15 mA	1.896 ± 0.056	1.983 ± 0.012	2.031 ± 0.063	1.993 ± 0.027
para 20 mA	1.901 ± 0.030	1.979 ± 0.012	2.027 ± 0.025	1.995 ± 0.019

(b)

Tabla 3.17. Resultados de Movilidad, de Tiempo Libre Medio y de Recorrido Libre Medio para las Cintas de $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_{3-x}Mo_xCu_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$:

(a) Resultados variando Corriente, (b) Resultados variando Campo.



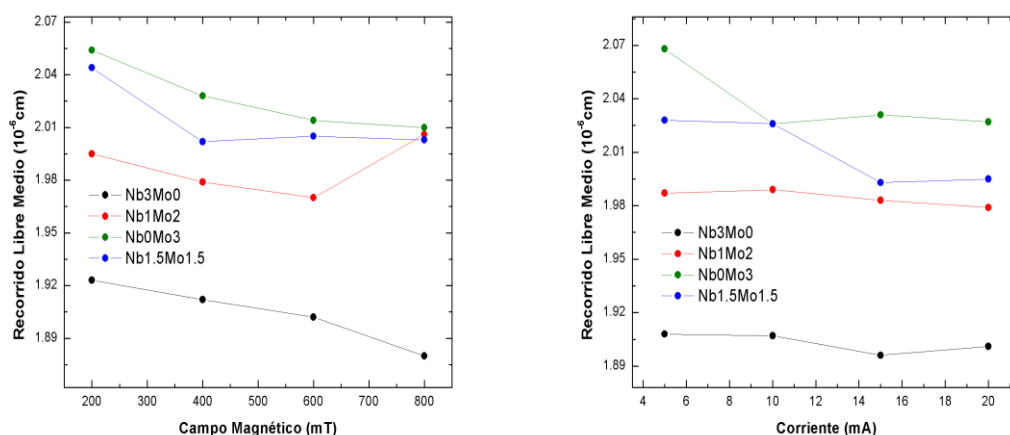


Figura 3.44. Gráficos de los Resultados de Movilidad, de Tiempo Libre Medio, y de Recorrido Libre Medio de las Cintas de $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_{3-x}Mo_xCu_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$.

En estos resultados (tabla 3.17 y figura 3.44) se pueden ver tiempos y recorridos libres medios del orden de 10^{-13} s y 10^{-6} cm respectivamente, con una relación directamente proporcional a la movilidad e inversa a la densidad. Estos valores son un poco mayores a los registrados en la literatura para materiales metálicos (con tiempos del orden de 10^{-14} s y recorridos del orden de 10^{-7} cm) [2,55].

Debido a que estas cintas son materiales ferromagnéticos, se esperaba ver en los anteriores resultados (gráficas de voltaje Hall y de densidad) el efecto Hall Anómalo (o Extraordinario) [19-21], sin embargo este efecto no es observado, y esto se debe muy posiblemente a que el campo magnético aplicado (máximo de 800 mT) todavía no es lo suficientemente fuerte para producir este efecto en dichas cintas magnéticas. También se puede pensar que el leve aumento en la densidad de portadores con el incremento del campo magnético podrían ser principios de efecto Hall Anómalo.

En la tabla 3.18 se muestra una comparación de los parámetros de transporte eléctrico de las diferentes muestras de material analizadas hasta el momento. En esta tabla se puede ver que el cobre, con la mayor densidad de portadores y la menor resistividad y movilidad, posee las mejores características eléctricas; luego se tiene en la parte intermedia a las cintas basadas en cobalto, y finalmente están las cintas tipo Finemet, siendo estas últimas menores conductoras eléctricas que las anteriores.

Material	Densidad de Portadores (cm^{-3})	Coefficiente Hall (cm^3/C)	Resistividad ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Movilidad ($\text{cm}^2/\Omega \cdot \text{C}$)	Tiempo Libre Medio (s)	Recorrido Libre Medio (cm)
Cobre	8.71×10^{22}	-7.18×10^{-5}	2.34×10^{-6}	30.63	1.74×10^{-14}	1.66×10^{-7}
Co₆₄Fe₂₁B₁₅	4.672×10^{20}	$+1.338 \times 10^{-2}$	1.252×10^{-4}	106.89	6.086×10^{-14}	5.782×10^{-7}
Co₇₁Fe₄B₁₅Si₁₀	1.990×10^{20}	$+3.141 \times 10^{-2}$	2.199×10^{-4}	142.85	8.133×10^{-14}	7.727×10^{-7}
Finemet Mo_{1.5}	1.604×10^{20}	$+3.897 \times 10^{-2}$	1.057×10^{-4}	368.77	2.100×10^{-13}	1.995×10^{-6}
Finemet Mo₃	1.403×10^{20}	$+4.454 \times 10^{-2}$	1.189×10^{-4}	374.73	2.133×10^{-13}	2.027×10^{-6}
Finemet Mo₂	1.246×10^{20}	$+5.014 \times 10^{-2}$	1.370×10^{-4}	365.96	2.084×10^{-13}	1.979×10^{-6}
Finemet Mo₀	1.162×10^{20}	$+5.378 \times 10^{-2}$	1.531×10^{-4}	351.48	2.001×10^{-13}	1.901×10^{-6}

Tabla 3.18. Resultados de Densidad de Portadores, Coeficiente Hall, Resistividad, Movilidad, y de Tiempo y Recorrido Libre Medio para la Muestra de Cobre, las Cintas Basadas en Cobalto, y para las Cintas tipo Finemet.

3.4.2 Caracterización eléctrica de $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ por medio de la Técnica Hall AC

Luego de hacer medidas con los sistemas DC sobre estas cuatro cintas Finemet (para $x = 0, 1.5, 2, 3$), se realizaron medidas de efecto Hall AC en estas cintas variando el campo magnético y la frecuencia de la corriente AC (de tipo senoidal) aplicada al material estudiado. Inicialmente se realizaron medidas de la amplitud Hall AC sobre estas cintas en función del campo magnético, entre -800 y 800 mT con un paso de campo de 16 mT, para diferentes frecuencias constantes de corriente alterna (20, 347, 673 y 1000 mHz) con una amplitud de 20 mA; cabe recordar que el sistema Hall AC construido trabaja solo para bajas frecuencias, como fue discutido en sección 3.3.2.3. Luego se realizaron medidas de amplitud Hall en función de la frecuencia, para un rango entre 10 y 1000 mHz con una amplitud de 20 mA de corriente AC, y para varios campos magnéticos constantes (200, 400, 600 y 800 mT). En las figuras 3.45, 3.46, 3.47 y 3.48 se presentan los gráficos de amplitud Hall como función del campo y como función de la frecuencia para estas cintas.

Los resultados de las medidas de amplitud Hall para dichas cintas (figuras 3.45 a la 3.48) del orden de 10^{-6} V, muestran una tendencia lineal de la amplitud con el campo aplicado, con una pendiente positiva de las rectas (electrones de carga “positiva” como portadores) y que casi no varía frente a la frecuencia de la corriente AC; mientras que los resultados de amplitud Hall en función de la frecuencia muestran una tendencia casi constante con la frecuencia (la amplitud casi no depende de la frecuencia), y un aumento del valor de amplitud con el incremento del campo magnético. Estas medidas de amplitud Hall son muy parecidas a las obtenidas con el sistema Hall DC de Cuatro Puntas para una corriente DC de 20 mA, y para los mismos valores de campo (máximo de 800 mT).

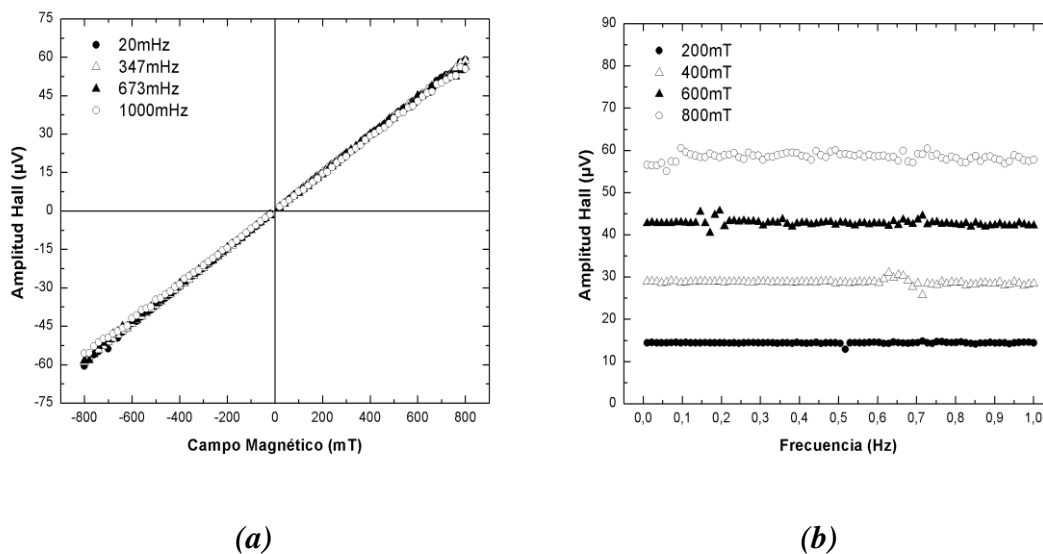


Figura 3.45. Amplitud Hall AC en función del Campo Magnético y de la Frecuencia para la Cinta Finemet Nb_3Mo_0 : (a) Amplitud vs Campo para varias frecuencias constantes, (b) Amplitud vs Frecuencia para varios campos constantes.

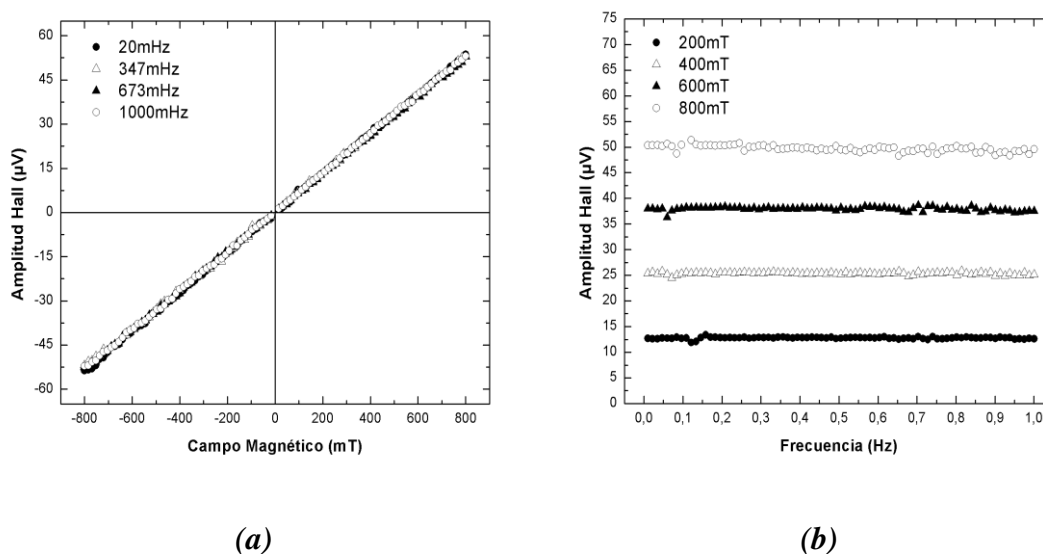
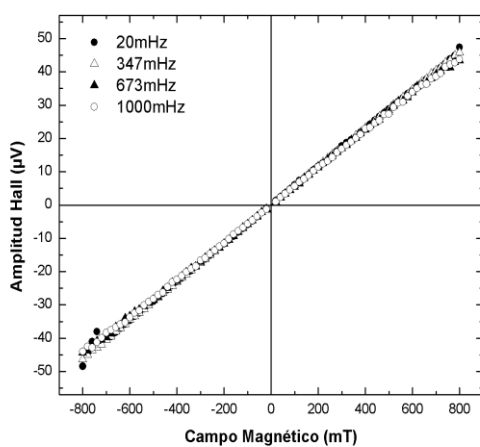
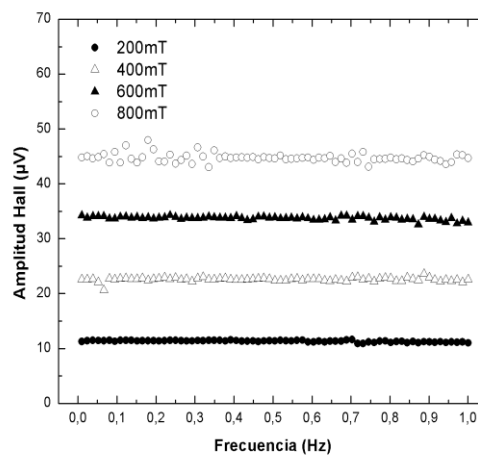


Figura 3.46. Amplitud Hall AC en función del Campo Magnético y de la Frecuencia para la Cinta Finemet Nb_1Mo_2 : (a) Amplitud vs Campo para varias frecuencias constantes, (b) Amplitud vs Frecuencia para varios campos constantes.

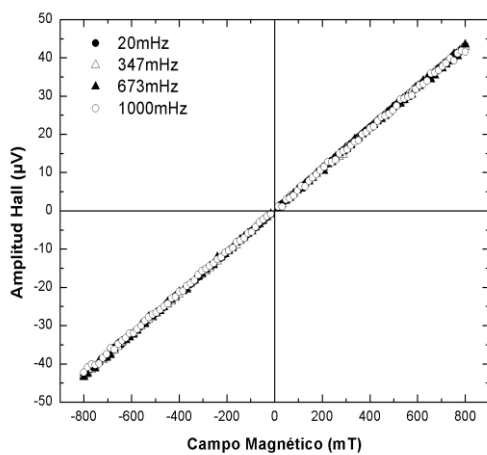


(a)

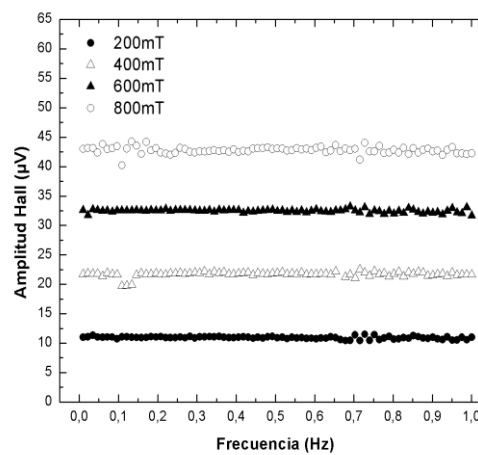


(b)

Figura 3.47. Amplitud Hall AC en función del Campo Magnético y de la Frecuencia para la Cinta Finemet Nb_0Mo_3 : (a) Amplitud vs Campo para varias frecuencias constantes, (b) Amplitud vs Frecuencia para varios campos constantes.



(a)



(b)

Figura 3.48. Amplitud Hall AC en función del Campo Magnético y de la Frecuencia para la Cinta Finemet $Nb_{1.5}Mo_{1.5}$: (a) Amplitud vs Campo para varias frecuencias constantes, (b) Amplitud vs Frecuencia para varios campos constantes.

La fase Hall para todas estas cintas presenta una tendencia a 0 Grados, con una desviación entre los ± 5 y ± 10 Grados, independientemente del campo magnético y de la frecuencia de la corriente aplicada, tal y como se vio en las medidas Hall AC sobre la cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ (ver sección 3.3.2.3). En otras palabras no hay una fase Hall observable, o por lo menos con la resolución del actual sistema de baja frecuencia, para frecuencias menores a 1 Hz.

A partir de los anteriores resultados de amplitud Hall AC se diseñaron las gráficas de densidad de portadores en función del campo magnético y de la frecuencia para todas las cintas estudiadas; estas gráficas se pueden observar en las figuras 3.49, 3.50, 3.51 y 3.52 respectivamente.

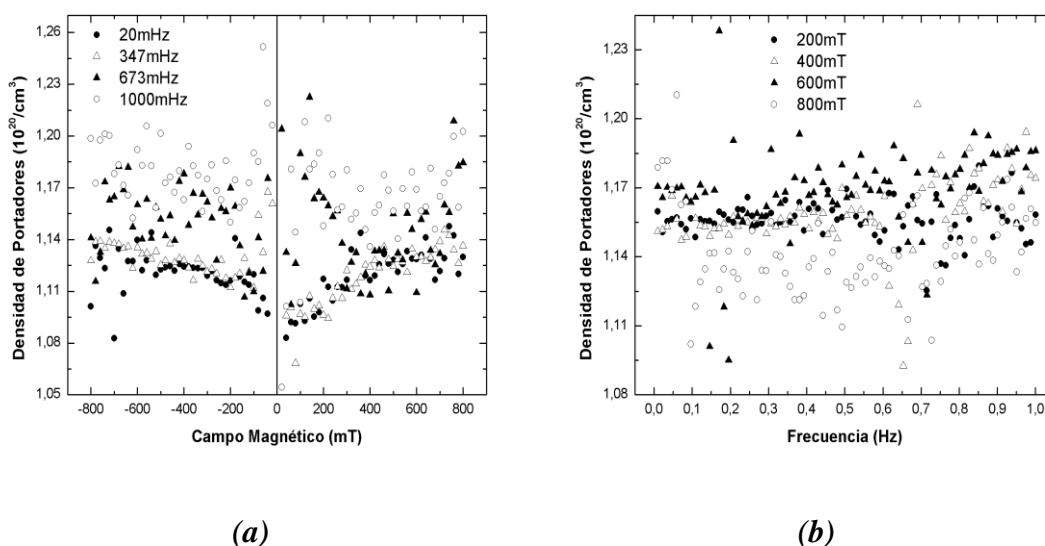


Figura 3.49. Densidad de Portadores en función del Campo Magnético y de la Frecuencia para la Cinta Finemet Nb_3Mo_0 : (a) Densidad vs Campo para varias frecuencias constantes, (b) Densidad vs Frecuencia para varios campos constantes.

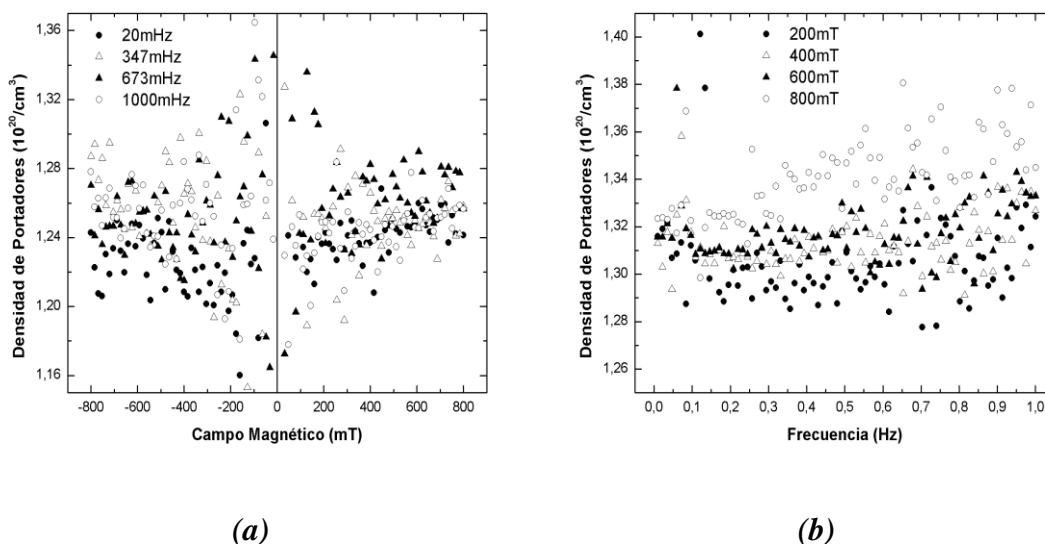


Figura 3.50. Densidad de Portadores en función del Campo Magnético y de la Frecuencia para la Cinta Finemet Nb_1Mo_2 : (a) Densidad vs Campo para varias frecuencias constantes, (b) Densidad vs Frecuencia para varios campos constantes.

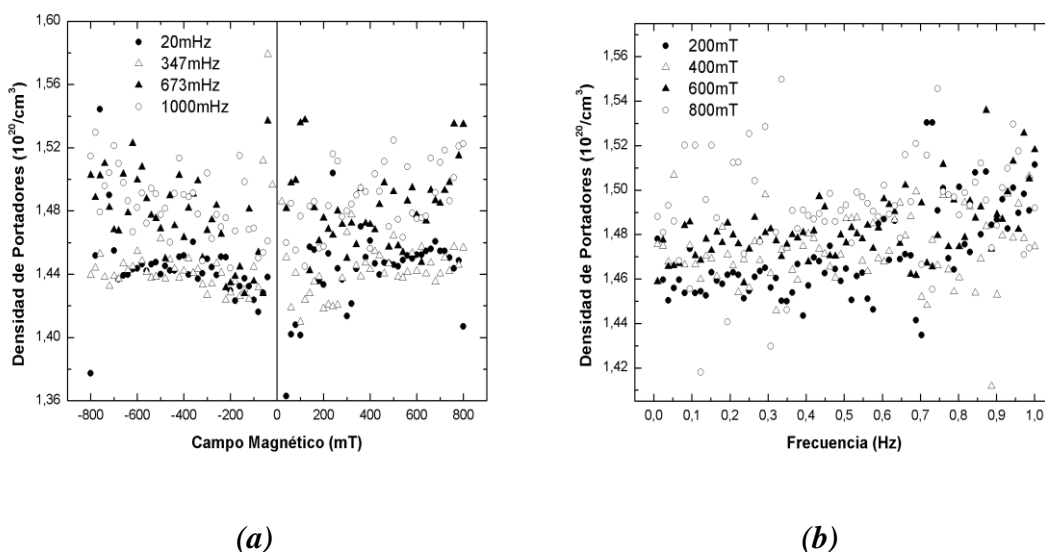


Figura 3.51. Densidad de Portadores en función del Campo Magnético y de la Frecuencia para la Cinta Finemet Nb_0Mo_3 : (a) Densidad vs Campo para varias frecuencias constantes, (b) Densidad vs Frecuencia para varios campos constantes.

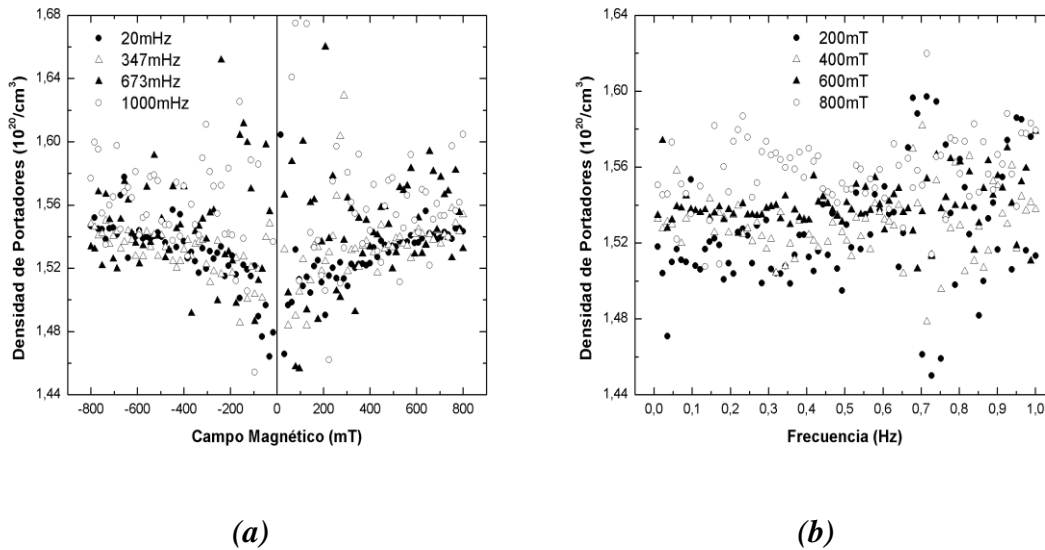


Figura 3.52. Densidad de Portadores en función del Campo Magnético y de la Frecuencia para la Cinta Finemet $\text{Nb}_{1.5}\text{Mo}_{1.5}$: (a) Densidad vs Campo para varias frecuencias constantes, (b) Densidad vs Frecuencia para varios campos constantes.

Todas estas gráficas de densidad (figuras 3.49 a la 3.52), del orden de 10^{20} cm^{-3} muestran un comportamiento casi no dependiente del campo magnético y de la frecuencia (ver variación en la escala de densidad), pero sin embargo se puede ver un leve aumento en la densidad de portadores con el incremento del campo aplicado (ver gráficas en función de campo) como en las medidas DC anteriores; y un leve incremento de la densidad con el aumento de la frecuencia (ver gráficas en función de frecuencia) aunque no con tanta claridad, esto último podría deberse a que la variación de corriente es tan rápida que el sistema no alcanza a estabilizarse para la medida.

En la figura 3.53 se muestra una comparación de las densidades de carga para las cintas tipo Finemet (para $x = 0, 1.5, 2, 3$), en función del campo y de la frecuencia. En estas gráficas se puede ver, como en el caso DC, un aumento de la densidad con el aumento

del porcentaje de Molibdeno (inverso a la cantidad de Niobio) excepto en el caso de la cinta de concentración $\text{Nb}_{1.5}\text{Mo}_{1.5}$ la cual tiene la mayor densidad.

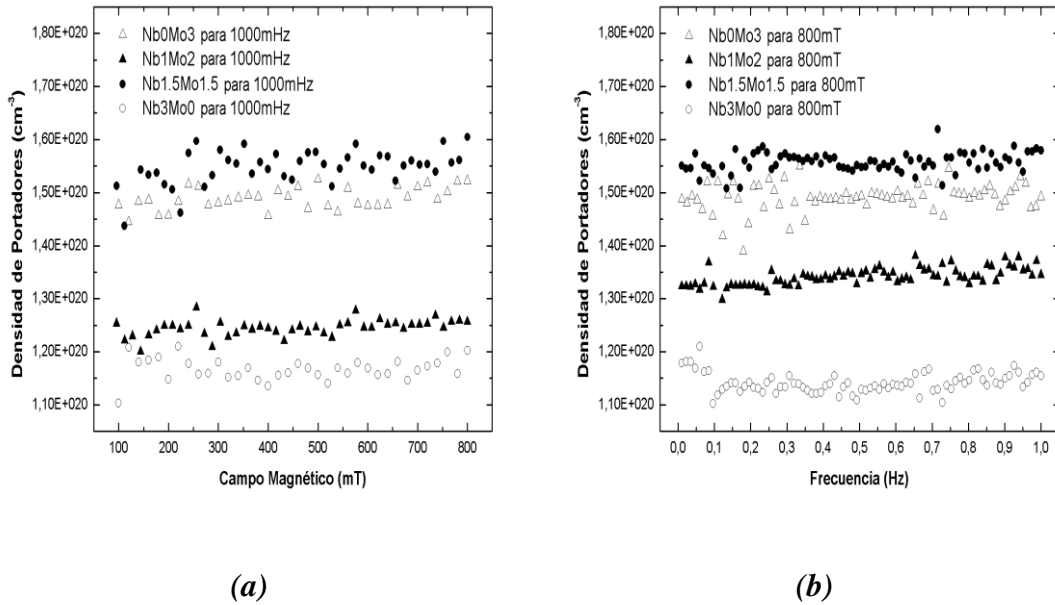


Figura 3.53. Densidad de Portadores en función del Campo y de la Frecuencia de las Cintas $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$: (a) Densidad vs Campo para una frecuencia de 1000 mHz, (b) Densidad vs Frecuencia para un campo de 800 mT.

A partir de estos resultados de densidad y los anteriores de resistividad se calcularon los valores promedios de densidad de carga, de coeficiente Hall, de movilidad, de tiempo y recorrido libre medio, los cuales se presentan en las tablas 3.19(a) y 3.19(b) variando campo y frecuencia respectivamente para todas las frecuencias y los campos constantes, con medidas muy similares para ambas tablas. En la figura 3.54 se muestran los gráficos de densidad de carga, de coeficiente Hall, de movilidad, de tiempo y recorrido libre medio diseñados a partir de estas tablas.

Todos estos resultados (ver tabla 3.19 y figura 3.54) son muy parecidos a los obtenidos con el sistema de efecto Hall DC, con una densidad del orden de 10^{20} cm^{-3} , un coeficiente Hall positivo (electrones de carga “positiva” como portadores) del orden de

$10^{-2} \text{ cm}^3/\text{C}$, una movilidad del orden de $10^2 \text{ cm}^2/\Omega\cdot\text{C}$, un tiempo libre medio del orden de 10^{-13} s , y un recorrido libre medio del orden de 10^{-6} cm , lo cual confirma la ubicación de estas cintas entre los materiales metálicos y los materiales semiconductores.

Densidad de Portadores (10^{20} cm^{-3})	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb0Mo3	Nb1.5Mo1.5
para 20 mHz	1.122±0.012	1.232±0.019	1.443±0.020	1.532±0.014
para 347 mHz	1.124±0.012	1.247±0.037	1.441±0.012	1.534±0.018
para 673 mHz	1.150±0.024	1.260±0.024	1.479±0.025	1.548±0.033
para 1000 mHz	1.172±0.019	1.249±0.024	1.488±0.020	1.556±0.034

Coefficiente Hall ($10^{-2} \text{ cm}^3/\text{C}$)	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb0Mo3	Nb1.5Mo1.5
para 20 mHz	5.569±0.063	5.073±0.078	4.331±0.060	4.080±0.038
para 347 mHz	5.558±0.059	5.014±0.152	4.337±0.036	4.074±0.049
para 673 mHz	5.435±0.115	4.961±0.096	4.225±0.072	4.038±0.088
para 1000 mHz	5.331±0.088	5.003±0.098	4.201±0.058	4.017±0.090

Movilidad ($\text{cm}^2/\Omega\cdot\text{C}$)	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb0Mo3	Nb1.5Mo1.5
para 20 mHz	363.86±4.09	370.24±5.68	364.30±5.08	386.06±3.59
para 347 mHz	363.16±3.88	365.91±11.11	364.85±3.03	385.48±4.68
para 673 mHz	355.11±7.54	362.06±6.98	355.45±6.07	382.03±8.29
para 1000 mHz	348.40±5.71	365.27±6.88	353.48±4.83	380.29±8.44

Tiempo Libre Medio (10^{-13} s)	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb0Mo3	Nb1.5Mo1.5
para 20 mHz	2.072±0.023	2.108±0.032	2.074±0.029	2.198±0.020
para 347 mHz	2.068±0.022	2.083±0.063	2.077±0.017	2.195±0.027
para 673 mHz	2.022±0.043	2.062±0.040	2.024±0.035	2.175±0.047
para 1000 mHz	1.983±0.033	2.079±0.041	2.012±0.028	2.164±0.049

Recorrido Libre Medio (10^{-6} cm)	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb0Mo3	Nb1.5Mo1.5
para 20 mHz	1.968±0.022	2.003±0.031	1.971±0.027	2.088±0.019
para 347 mHz	1.964±0.021	1.979±0.060	1.974±0.016	2.085±0.025
para 673 mHz	1.921±0.041	1.958±0.038	1.923±0.033	2.066±0.045
para 1000 mHz	1.884±0.031	1.975±0.039	1.911±0.026	2.056±0.046

(a)

Densidad de Portadores (10^{20} cm⁻³)	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb0Mo3	Nb1.5Mo1.5
para 200 mT	1.156±0.008	1.305±0.020	1.471±0.020	1.525±0.030
para 400 mT	1.159±0.016	1.313±0.012	1.473±0.016	1.532±0.024
para 600 mT	1.169±0.019	1.318±0.013	1.483±0.015	1.540±0.013
para 800 mT	1.142±0.019	1.341±0.016	1.491±0.026	1.559±0.021

Coefficiente Hall (10^{-2} cm³/C)	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb0Mo3	Nb1.5Mo1.5
para 200 mT	5.405±0.039	4.790±0.073	4.250±0.059	4.098±0.082
para 400 mT	5.394±0.077	4.759±0.043	4.243±0.046	4.080±0.065
para 600 mT	5.345±0.088	4.741±0.047	4.216±0.043	4.057±0.035
para 800 mT	5.475±0.092	4.660±0.057	4.192±0.075	4.010±0.056

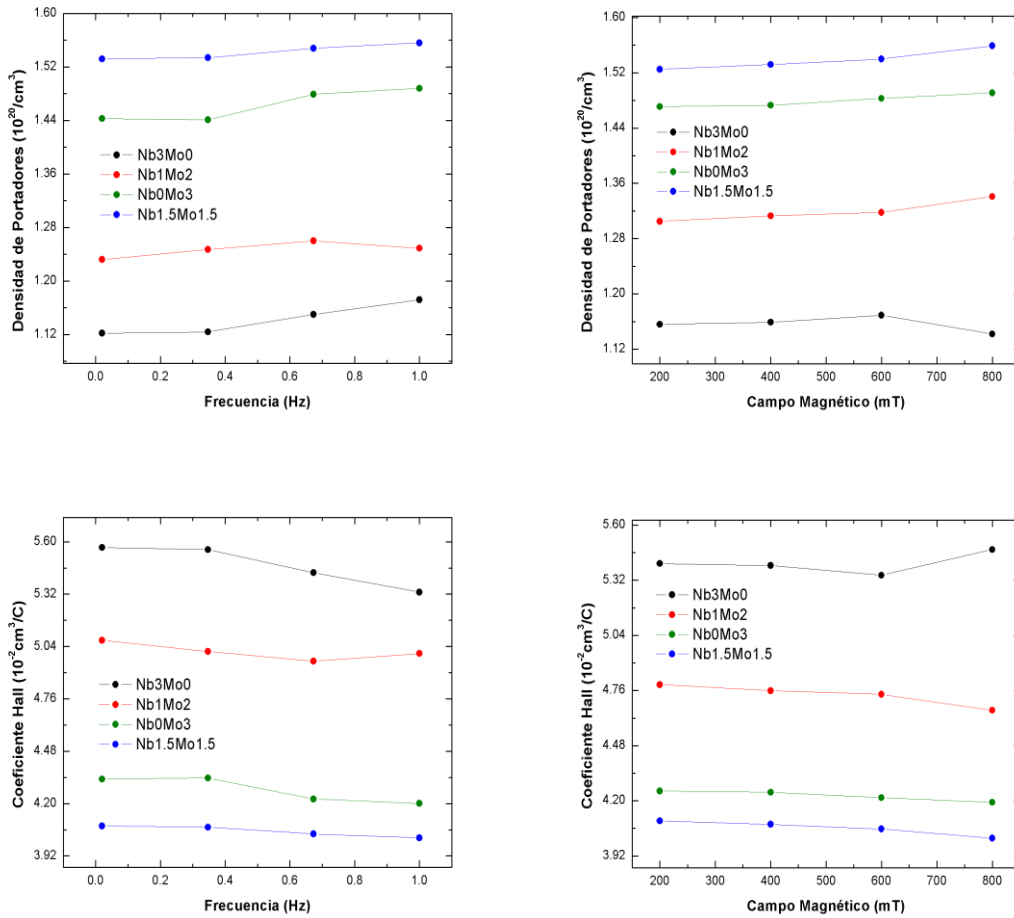
Movilidad (cm²/Ω·C)	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb0Mo3	Nb1.5Mo1.5
para 200 mT	353.16±2.56	349.59±5.31	357.51±4.95	387.71±7.80
para 400 mT	352.43±5.02	347.30±3.11	356.91±3.86	386.00±6.14
para 600 mT	349.22±5.77	346.01±3.46	354.63±3.59	383.89±3.29
para 800 mT	357.81±5.86	340.15±4.13	352.78±6.36	379.48±5.16

Tiempo Libre Medio (10^{-13} s)	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb0Mo3	Nb1.5Mo1.5
para 200 mT	2.011±0.015	1.990±0.030	2.036±0.028	2.208±0.044
para 400 mT	2.007±0.029	1.977±0.018	2.032±0.022	2.198±0.035
para 600 mT	1.988±0.033	1.970±0.020	2.019±0.020	2.186±0.019
para 800 mT	2.037±0.034	1.936±0.024	2.008±0.036	2.160±0.030

Recorrido Libre Medio (10^{-6} cm)	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb0Mo3	Nb1.5Mo1.5
para 200 mT	1.910 ± 0.014	1.891 ± 0.029	1.934 ± 0.027	2.097 ± 0.042
para 400 mT	1.906 ± 0.027	1.879 ± 0.017	1.931 ± 0.021	2.088 ± 0.033
para 600 mT	1.889 ± 0.031	1.872 ± 0.019	1.918 ± 0.019	2.077 ± 0.018
para 800 mT	1.935 ± 0.033	1.840 ± 0.023	1.908 ± 0.034	2.052 ± 0.029

(b)

Tabla 3.19. Resultados de Densidad de Portadores, Coeficiente Hall, Movilidad, Tiempo y Recorrido Libre Medio para las Cintas de $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_{3-x}Mo_xCu_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$ obtenidos con la Técnica Hall AC: (a) Resultados variando Campo, (b) Resultados variando Frecuencia.



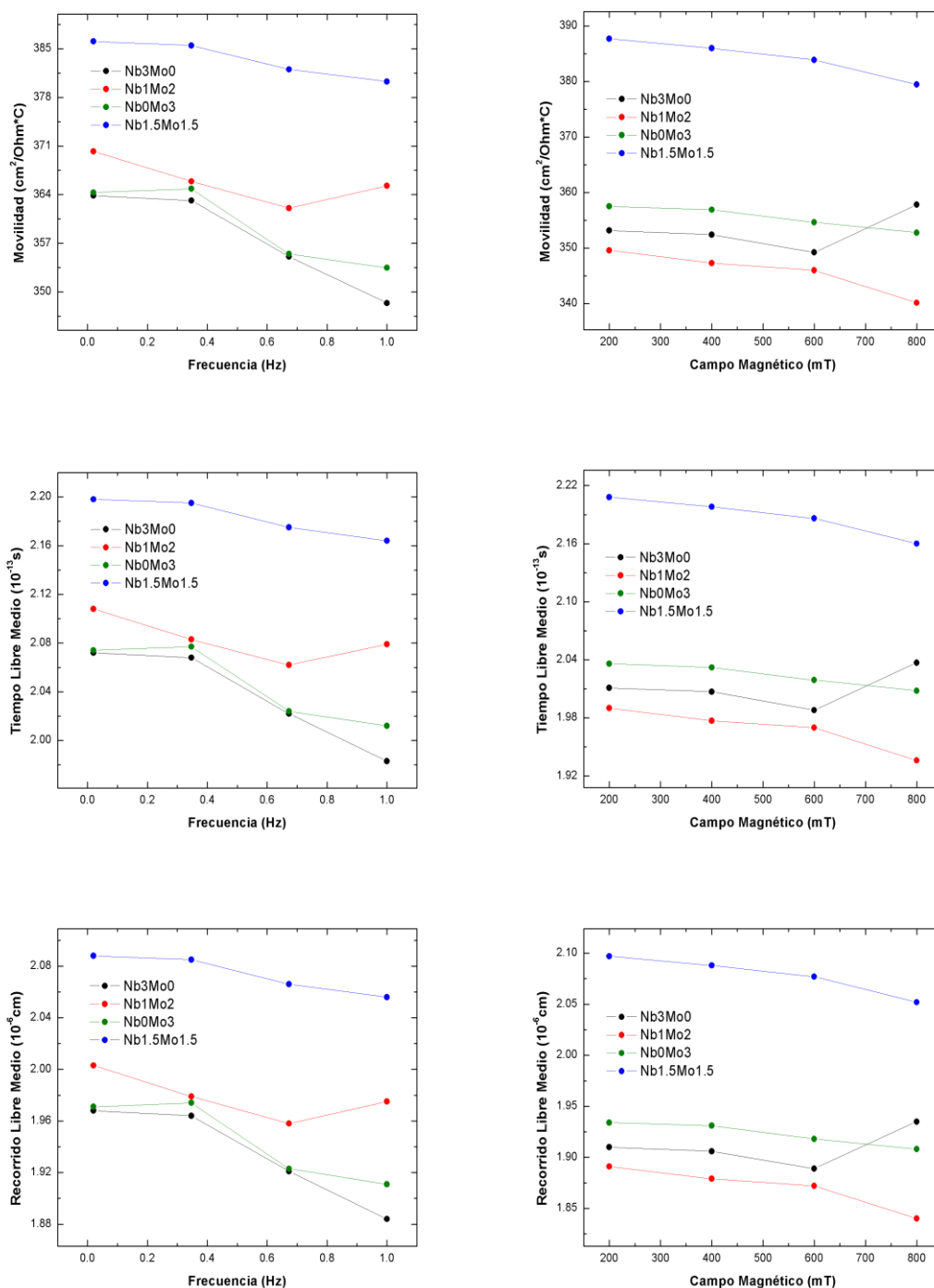


Figura 3.54. Gráficos de los Resultados Hall AC de Densidad, de Coeficiente Hall, de Movilidad, de Tiempo Libre Medio y Recorrido Libre Medio de las Cintas de Finemet.

En conclusión, se puede decir que los resultados de las medidas realizadas con la técnica de efecto Hall AC de baja frecuencia (hasta los 1 Hz) para las cintas estudiadas son muy similares a los resultados obtenidos por medio de las técnicas de efecto Hall DC; con la ventaja de ofrecer resultados de menor ruido, comparados con las medidas hechas con las técnicas DC.

3.4.3 Caracterización magnética de $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ por medio de las Técnicas de Magnetización DC y Susceptibilidad AC

Sobre estas cuatro cintas tipo Finemet (para $x = 0, 1.5, 2, 3$), también se realizaron medidas con los sistemas de Magnetización DC y de Susceptibilidad Magnética AC a temperatura ambiente para conocer sus propiedades magnéticas. Primero se llevaron a cabo medidas de magnetización en estas cintas, con diferentes concentraciones de Niobio (Nb) y Molibdeno (Mo), en función de campo magnético, para campos entre -27000 y 27000 Oe (ciclo de histéresis), a una temperatura de 300 K para las cintas de 4 por 3 mm de lado, empleando la técnica de Magnetometría DC [56,57]. En la figura 3.55 se presenta la gráfica de magnetización (en emu por gramo) en función del campo para estas cintas.

En esta gráfica (figura 3.55) no se aprecia histéresis para las cintas analizadas, lo cual es característico de materiales magnéticos blandos (fácilmente magnetizables y desmagnetizables). También se puede observar una magnetización de saturación muy parecida para todas las cintas, siendo de 132.602 emu/g para Nb_1Mo_2 , 135.281 emu/g para Nb_3Mo_0 , 135.556 emu/g para Nb_0Mo_3 , y de 141.033 emu/g para $\text{Nb}_{1.5}\text{Mo}_{1.5}$. Estos resultados favorecen magnéticamente a la cinta de concentración $\text{Nb}_{1.5}\text{Mo}_{1.5}$ sobre las otras por su mayor magnetización de saturación, luego se tiene en la parte intermedia a las cintas de Nb_0Mo_3 y Nb_3Mo_0 con valores muy próximos, y finalmente esta la cinta de Nb_1Mo_2 con la menor magnetización de saturación.

Luego se realizaron medidas de susceptibilidad AC sobre estas cintas magnéticas a temperatura ambiente [58,59]. Estas medidas se hicieron variando el campo magnético entre -74 y 74 Oe (ciclo de histéresis) con un paso de campo de 1 Oe, manteniendo una frecuencia fija de 3000 Hz, y con una longitud de cinta de 1 cm. En las figuras 3.56 y 3.57 se muestran las gráficas de susceptibilidad real y susceptibilidad imaginaria (en unidades arbitrarias u.a) en función del campo para una frecuencia constante de estas cintas respectivamente.

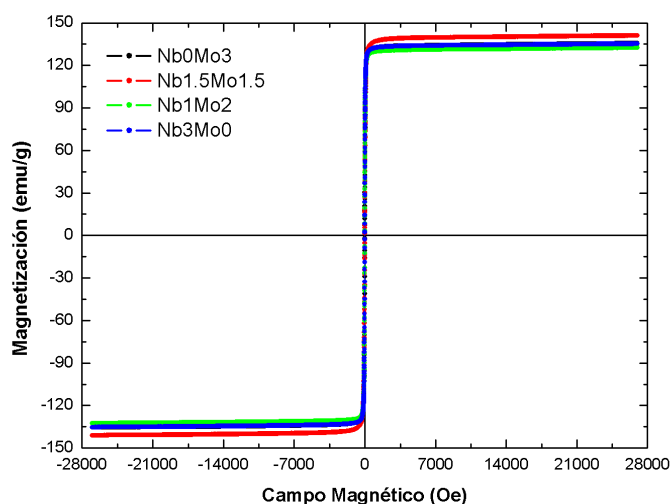


Figura 3.55. Magnetización en función del Campo Magnético de las Cintas $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_{3-x}Mo_xCu_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$.

En ambas gráficas (figuras 3.56 y 3.57) se pueden ver picos bien definidos de susceptibilidad (sin mesetas) para todas las cintas, lo cual es propio de materiales magnéticamente blandos, siendo la parte real de la susceptibilidad relacionada con la dinámica del sistema (movimiento de dominios magnéticos), mientras que la parte imaginaria (menor a la real) se encuentra asociada a pérdidas de energía (procesos disipativos) en el material [58]. En la tabla 3.20 se muestran los valores correspondientes a los picos de susceptibilidad real e imaginaria para dichas cintas.

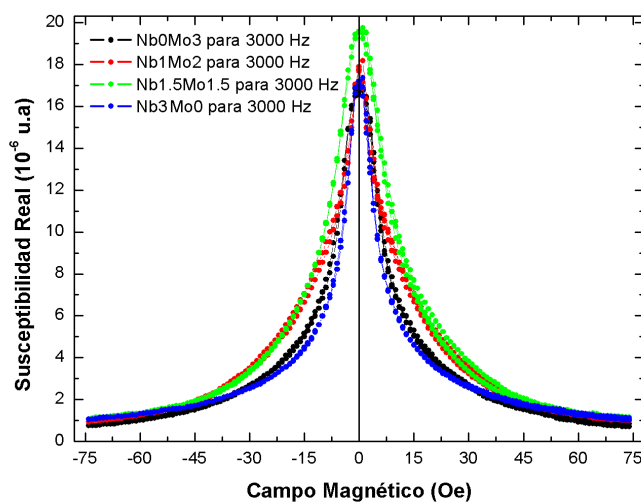


Figura 3.56. *Susceptibilidad Real en función del Campo Magnético para una frecuencia de 3000 Hz de las Cintas $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_{3-x}Mo_xCu_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$.*

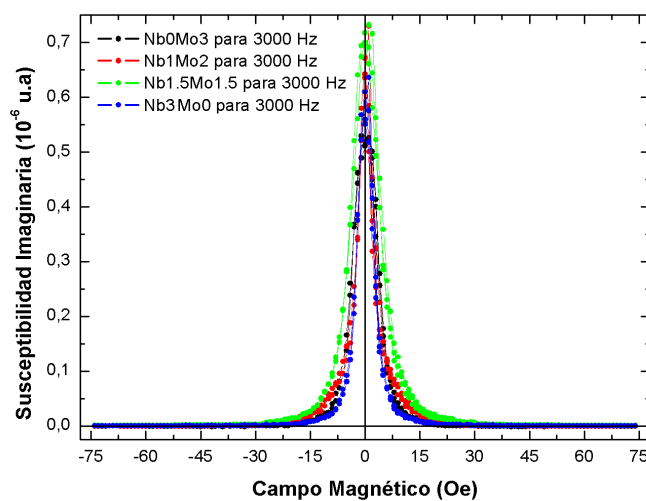


Figura 3.57. *Susceptibilidad Imaginaria en función del Campo Magnético para una frecuencia de 3000 Hz de las Cintas $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_{3-x}Mo_xCu_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$.*

Pico de Susceptibilidad	Nb0Mo3	Nb3Mo0	Nb1Mo2	Nb1.5Mo1.5
Real (10^{-6} u.a)	16.726	17.008	17.877	19.508
Imaginaria (10^{-6} u.a)	0.5110	0.5512	0.6712	0.6983

Tabla 3.20. Resultados de Pico de Susceptibilidad Real e Imaginaria para las Cintas de $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_{3-x}Mo_xCu_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$.

Estos resultados (ver figura 3.56, figura 3.57, y tabla 3.20) muestran una mayor susceptibilidad magnética para la cinta de concentración $Nb_{1.5}Mo_{1.5}$, luego se tiene en segundo lugar a la cinta de Nb_1Mo_2 , y por ultimo están las cintas de Nb_3Mo_0 y Nb_0Mo_3 con los menores valores de susceptibilidad (con valores muy cercanos).

Finalmente se puede relacionar los resultados de las medidas de efecto Hall, de magnetización, y de susceptibilidad magnética obtenidos para todas las cintas Finemet (para $x = 0, 1.5, 2, 3$). En la tabla 3.21 se presentan los resultados en forma ascendente de densidad de portadores, de magnetización de saturación, y de pico de susceptibilidad para las cintas estudiadas.

Todos estos resultados (ver tabla 3.21) muestran que la cinta de concentración $Nb_{1.5}Mo_{1.5}$ (con igual cantidad de Niobio y Molibdeno) posee las mejores características eléctricas y magnéticas, siendo esta cinta magnética la más blanda y la de mejor conducción eléctrica de las cuatro. También se puede pensar que el contenido de Molibdeno favorece las propiedades eléctricas y magnéticas de las cintas sobre el contenido de Niobio. Una forma de dar claridad en esto último sería mejorando la precisión de las medidas de longitud y masa de las cintas, requerido para las medidas de magnetización y susceptibilidad.

Densidad de Portadores (10^{20} cm^{-3})	Magnetización de Saturación (emu/g)	Pico de Susceptibilidad Real (10^{-6} u.a)
1.172 para Nb ₃ Mo ₀	132.60 para Nb ₁ Mo ₂	16.73 para Nb ₀ Mo ₃
1.249 para Nb ₁ Mo ₂	135.28 para Nb ₃ Mo ₀	17.01 para Nb ₃ Mo ₀
1.488 para Nb ₀ Mo ₃	135.56 para Nb ₀ Mo ₃	17.88 para Nb ₁ Mo ₂
1.556 para Nb _{1.5} Mo _{1.5}	141.03 para Nb _{1.5} Mo _{1.5}	19.51 para Nb _{1.5} Mo _{1.5}

Tabla 3.21. Resultados de Densidad de Portadores, de Magnetización de Saturación, y de Pico de Susceptibilidad Real para las Cintas de $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$.

4. Conclusiones

- Se construyó un sistema de medidas de efecto Hall altamente reproducible, en configuración de cuatro puntas y basado en la técnica de Van Der Pauw, el cual permite obtener medidas de voltaje Hall, de densidad de portadores, y de movilidad en función de la corriente y del campo magnético. Este sistema también se destaca porque puede ser modificado y actualizado.
- Para conocer propiedades dinámicas de transporte eléctrico de materiales conductores y semiconductores se desarrolló una técnica de efecto Hall AC de baja frecuencia (0.001–1 Hz) que permite realizar medidas Hall a temperatura ambiente variando el campo magnético y la frecuencia.
- Para verificar el funcionamiento del sistema de medidas de resistividad se construyeron dos circuitos de resistencias que simulaban muestras de material conductor y semiconductor. Los resultados de las medidas sobre dichos circuitos sirvieron para demostrar el buen desempeño del sistema.
- Buscando verificar el buen funcionamiento de los sistemas de medidas de efecto Hall DC se hicieron dos circuitos impresos como muestras de cobre sobre los cuales se llevaron a cabo una serie de pruebas; los resultados mostraron un

coeficiente Hall, una densidad, y una movilidad de portadores muy similares a los valores reportados en la literatura para el cobre.

- Buscando la forma de realizar medidas Hall sobre materiales se construyeron varios portamuestras como circuitos impresos en donde la muestra es contactada, ya sea mediante pintura conductora o por la técnica de presión desarrollada, siendo estos contactos una parte crucial en el proceso, ya que pueden ser generadores de varias fuentes de error en las medidas.
- Se realizó una caracterización eléctrica de diferentes cintas magnéticas blandas con las técnicas Hall DC y AC desarrolladas. Estas medidas mostraron bajas resistividades ($10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$) y elevados valores de densidad (10^{20} cm^{-3}), lo cual es característico de materiales de buena conductividad. También mostraron pendientes de voltaje Hall positivas, indicando a los electrones de carga “positiva” como portadores.
- Los resultados de las medidas de magnetotransporte sobre las cintas de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$ y $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$, mostraron a esta última, de menor cantidad de Cobalto y mayor de Hierro, y sin contenido de Silicio, como la mejor conductora eléctrica. Además como resultado de este estudio se publicó un artículo en la Revista Colombiana de Física [60], en el cual se muestra a esta cinta como la de mejores propiedades magnéticas y eléctricas.
- Los resultados obtenidos con la técnica de efecto Hall AC de baja frecuencia fueron muy similares a los obtenidos con los sistemas Hall DC, con los mismos órdenes de voltaje, de densidad y de movilidad; y con un leve aumento en la densidad de carga con el incremento del campo, confirmando así los resultados.

- Se realizaron medidas de resistividad sobre cintas de $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$ con el sistema desarrollado; los resultados de estas medidas mostraron el mismo orden ($10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$) y valores muy similares a los obtenidos en la U. de Buenos Aires para las mismas cintas, verificando así el buen funcionamiento del sistema.
- Los resultados de las medidas de magnetotransporte sobre las cintas de $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$; mostraron un aumento en la densidad de carga con el incremento de la cantidad de Molibdeno y disminución de Niobio, excepto en el caso para $x = 1.5$ (igual cantidad de Niobio y Molibdeno) en el cual se obtiene la mayor densidad y la menor resistividad, siendo esta última la mejor conductora eléctrica.
- Se realizaron medidas de Magnetización DC y de Susceptibilidad Magnética AC a temperatura ambiente sobre cintas de $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_{3-x}\text{Mo}_x\text{Cu}_1$ para $x = 0, 1.5, 2, 3$; cuyos resultados mostraron una mayor magnetización de saturación y un mayor pico de susceptibilidad real e imaginaria para la cinta en la cual $x = 1.5$. Estos resultados y los obtenidos con el sistema de efecto Hall muestran que esta cinta posee las mejores propiedades magnéticas y eléctricas.

5. Perspectivas

- Para mejorar las medidas obtenidas con los sistemas Hall contruidos se puede conseguir o diseñar una técnica que permita obtener contactos de muestra de mejor calidad que los propuestos en este trabajo.
- Realizar caracterizaciones eléctricas sobre otros materiales, como los metales, las cintas magnéticas y los semiconductores (intrínsecos o extrínsecos). Estas caracterizaciones pueden constituir el fundamento de otros trabajos de grado o investigaciones de tipo industrial.
- Adquirir un sistema para variación de temperatura que permita llevar a cabo medidas Hall en función de la temperatura, para temperaturas cercanas al cero absoluto. Mediante este sistema se podrían hacer gráficos de conductividad en función de la temperatura de materiales semiconductores y así conocer sus gap de energía.
- Minimizar el ruido, los efectos termoeléctricos y la asimetría de contactos para reducir la dispersión de las medidas. También sería interesante trabajar con campos magnéticos más altos, y así poder estudiar fenómenos como el efecto Hall anómalo en materiales ferromagnéticos.

- Mirar las modificaciones necesarias en el sistema Hall AC para mejorar la sincronización de los equipos y así poder realizar medidas en frecuencias más altas y con una mejor resolución de fase.
- Estudiar la posibilidad de hacer mediciones de otros fenómenos relacionados con el efecto Hall, como el efecto Hall cuántico y de spin, el efecto Hall anómalo, entre otros. Para realizar estos estudios seguramente será necesario una modificación tanto de software como de hardware.

6. Bibliografía

- [1] R. Resnick y D. Halliday. *Physics. Part. II* 3a. ed. John Willey & Sons, Nueva York, 1978, secs. 33-35
- [2] N. W. Ashcroft y N. D. Mermin, *Solid State Physics*, Holt-Saunders Int. Editions, 1981.
- [3] C. Kittel. *Introduction to Solid State Physics*. 3a. ed. John Willey & Sons, 1967.
- [4] *Física del Estado Sólido*, P.V. Pavlov, A.F. Jojlov, Moscú: Editorial Mir–Rubiños.
- [5] A. Venegas, N. Alba, E. Munévar. *Montaje Y Caracterización De Las Bobinas De Helmholtz Para Realizar Medidas De Efecto Hall A Temperatura Ambiente Sobre Muestras De Cobre Y Zinc*. Universidad Distrital. Bogotá, 2000.
- [6] Lab. de Electricidad y Magnetismo. *Efecto Hall en Germanio*. Dep. de Física, U. Carlos III, Madrid.
- [7] *Física de los Semiconductores*, K.V. Shalíмова, Moscú: Editorial Mir 1975.
- [8] J.P. McKelvey, *Física del Estado Sólido y de Semiconductores*, (Limusa. México. 1980).
- [9] E.G.D. Cohen and W. Thirring, editors, *The Boltzmann Equation: Theory and Applications*, (Springer-Verlag, Wien, 1973).
- [10] L.A.P. Goncalves, J.M. Soares, F.L.A. Machado, W.M. de Azevedo, Physica B 384 (2006) 152-154.
- [11] Y.W. Lee, C.G. Kim, C.O. Kim, Y.T. Park, J. Magn. Mater. 242–245 (2002)
- [12] S. G. Kaplan, S. Wu, H.-T. S. Lihn, and H. D. Drew, Phys. Rev. Lett. Vol. 76 Num. 4, 696–699 (1996).

- [13] L. D. Landau y E. M. Lifshitz, “*Electrodynamics of Continuous Media*”, Addison – Wesley Publishing Company, inc., USA (1960).
- [14] E.M. Farías de la Torre, D. González Dondo, G.N. Monardez, R.A. Ricón, L.N. Alem. *Kit para la medición del Efecto Hall en una placa metálica*. Universidad Tecnológica Nacional. Argentina, 2006.
- [15] PHYWE series of publications. Laboratory experiments. Leybold. *Efecto Hall en Metales*. <http://www.phywe.com>.
- [16] PHYWE series of publications. *Hall effect in n-germanium, Hall effect in p-germanium*. <http://www.phywe.com>
- [17] Adler, R.B. Smith, A.C. Longini, R.L. “*Introducción a la física de los semiconductores*”, I, Reverte, Barcelona (1970).
- [18] Sears Zemansky. Young - Freedman. *Física Universitaria* vol 2. Addison Wesley Longman. México 1999.
- [19] H. Chiriac, M. Lozovan, M. Neagu, C. Hison, J. Magn. Magn. Mater. 215-216, 378 (2000).
- [20] C. M. Hurd, *Hall Effect in Metals and Alloys*, Plenum Press, New York, 1972.
- [21] M. Ziese y C. Srinitiwara Wong, “Extraordinary Hall Effect in $\text{La}_{0.33}\text{Ca}_{0.67}\text{MnO}_3$ and $\text{La}_{0.33}\text{Ba}_{0.67}\text{MnO}_3$ ” Europhys. Lett., **45**(2),256-262 (1999).
- [22] L. E. Vidal Salgado, *Diseño y Construcción de un Sistema de Medidas de Efecto Hall Basado en la Técnica de Van Der Pauw*. 2006.
- [23] “*Standard Test Methods for Measuring Resistivity and Hall Coefficient and Determining Hall Mobility in Single-Crystal Semiconductors*”, ASTM Designation F76, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 10.05 (2000).
- [24] E. H. Hall, “*On a New Action of the Magnet on Electrical Current*”, Amer. J. Math. **2**, 287-292 (1879).
- [25] E. H. Putley, *The Hall Effect and Related Phenomena*, Butterworths, London (1960).
- [26] L. J. Van Der Pauw, “*A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shapes*”, Philips Res. Repts. **13**, 1-9 (1958).

- [27] Lake Shore. **Hall Effect Measurements**. Series Hall System User's Manual.
- [28] R. Chwang, B. J. Smith and C. R. Crowell, "**Contact Size Effects on the Van Der Pauw Method for Resistivity and Hall Coefficient Measurement**", Solid-State Electronics **17**, 1217-1227 (1974).
- [29] A. Sáenz R. **Aparato para la Medición del Efecto Hall y la Resistividad de Metales y Aleaciones en forma de Películas Delgadas**. Rev. Mexicana de Física 34 No. 1(1988).
- [30] C.M. Hurd, *J. Sci. Instrum.* 42 (1965) 465.
- [31] O. Lindberg, *Proceedings of the IRE* (nov 1952) 1414.
- [32] Isenberg, Russel y Greene, *Rev. Sci. Instrum.* 19 (1948) 685.
- [33] J. Sánchez Marcos, **Sistema de Medida de la Resistividad Eléctrica a Altas Temperaturas y su Aplicación a los Compuestos $U_{1-x}La_xPt$** . Dep. de ciencias de la tierra y física de la materia condensada U. de Cantabria.
- [34] **Soldadura**, <http://es.wikipedia.org/wiki/Soldadura>.
- [35] R. Ramírez Vázquez, **Procesos de Soldadura Bajo Atmosfera Protectora**, <http://www.foro-industrial.com/docs/soldadurabajoatmosferaprotectora.pdf>
- [36] M. Neagu, H. Chiriac, M. Lozovan, *Sensors Act. A* 106 (2003) 73.
- [37] **Sensores Basados en el Efecto Hall**, <http://egaermac.iespana.es/Proyecto/aplicaciones.html>
- [38] Sypris Test & Measurement, Inc. www.fwbell.com
- [39] ChenYang, **Sensors and Measurements**, <http://www.cy-sensors.com/>
- [40] "**Operation and application of the Sentron CSA-IV-SO surface mount current sensor**". www.gmw.com/electric_current/Sentron/documents/AN_102_REV_C.pdf
- [41] **Sensores en el automóvil**, <http://www.mecanicavirtual.org/sensores3.htm>
- [42] Lake Shore Cryotronics, Inc. www.lakeshore.com
- [43] LEYBOLD "Leybold didactic GMBH" (1994).
- [44] Hernán Rodríguez, L. Camilo Jiménez. **Unidad para Supervisión y Control de Medición de Efecto Hall con Labview**. Universidad Javeriana, Bogotá, 2008.

- [45] UNNE – Fac. de Ingeniería – Física Electromagnética y Atómica. UNIDAD III: ***Corriente eléctrica y circuitos eléctricos.***
- [46] Serway. ***Física.*** Tomo II. Cuarta edición. McGraw Hill.
- [47] Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile. ***Apuntes de un curso de Introducción a la Física de Sólidos.*** Primera edición.
- [48] N. S. Saks and S.-H. Ryu. Code 6813, Naval Research Lab., Washington, D.C. 20375, USA. ***Hall Effect Measurements in SiC Buried-Channel MOS devices.***
- [49] Jasprit Singh. ***Dispositivos Semiconductores.*** Mc Graw Hill. 1997.
- [50] Chetan Kayak. ***Solid State Physics.*** Physics 140a. Franz 1354; M, W 11:00-12:15 O_cce Hour: TBA; Knudsen 6-130J. Section: MS 7608; F 11:00-11:50. TA: Sumanta Tewari. University of California, Los Angeles.
- [51] Zigmantas Jankauskas, Vygaudas Kvedaras, Laimis Laurinavicius. ***The Measurements of Carrier Density and Mobility in Magnetised Materials by the Help of Helicon Maser.*** Department of Electrical Engineering Vilnius Gediminas Technical University Sauletekio av.11, LT-2040 Vilnius Lithuania.
- [52] Micrómetro Mecánico de SCHWYZ y Equipo de Ultrasonido de Panametrics.
- [53] Calibre Digital Pie de Rey 799 de Starrett.
- [54] Información suministrada por la Doctora Josefina Sylveira de la Universidad de Buenos Aires.
- [55] G. Bradley Armen. ***Hall Effect Experiment.*** The University of Tennessee. Knoxville, Tennessee 2007.
- [56] A. Rosales Rivera, J. A. Restrepo, M. A. Sanin, O. E. Patiño. ***Desarrollo de un magnetómetro de muestra vibrante.*** Revista Colombiana de Física, Vol. 38 No. 1, 2006.
- [57] Foner, Simon, ***“The Vibrating Sample Magnetomer: Experience of a Volunteer”***, Review Applications Physics, American Institute of Physic 1996.
- [58] A Velásquez. ***“Diseño y desarrollo de la técnica de susceptibilidad magnética ac: aplicación al estudio de cintas magnéticamente blandas”.*** Tesis de maestría. Universidad Nacional, Manizales. 2009.

- [59] *AC Susceptibility Measurements in High-T_c Superconductors*. Experiment ACS; University of Florida; Department of Physics PHY4803L; Advanced Physics Laboratory.
- [60] A. Rosales-Rivera, J. Jaither Melo, A. Velásquez. *Comportamiento Magnético y Propiedades de Magneto-transporte de Cintas Magnéticas Blandas Basadas en Cobalto*. Revista Colombiana de Física, Vol. 42 No. 3, 2010.

A. Anexo: Manual del Usuario del Sistema de Medidas de Efecto Hall DC Y AC

A.1 Hardware del sistema

El sistema de efecto Hall DC y AC construido consta de los siguientes equipos:

- Fuente de Corriente Keithley 6221 DC y AC
- Nanovoltmetro Keithley 2182A
- Fuente de Corriente Agilent 6675A
- Gaussímetro LakeShore 455 DSP
- Circuito Inversor de Campo
- Conmutador
- Electroimán
- Computador

En el caso de que se requiera la incorporación de un nuevo equipo, el software del sistema puede ser modificado para admitirlo, esto se hace agregando el subprograma o driver correspondiente del nuevo equipo al programa principal.

Antes de colocar el sistema en funcionamiento se requiere de la verificación de las siguientes conexiones:

- Conexión vía GPIB de los equipos Nanovoltmetro Keithley 2182A, Fuente de Corriente Agilent 6675A, y Gaussímetro LakeShore 455 DSP con el equipo de Fuente de Corriente Keithley 6221 DC y AC.
- Las conexiones a través del Puerto Paralelo del Computador con el Circuito Inversor de Campo y con el Conmutador.
- La conexión vía GPIB-USB de la Fuente de Corriente Keithley 6221 DC y AC con el Computador.
- Conexiones de la Fuente de Corriente Keithley 6221 y del Nanovoltmetro Keithley 2182A con el Conmutador (Sistema de Van Der Pauw) y de este a la muestra, o con conexión directa a la muestra de material (Sistema de Cuatro Puntas y Sistema AC).
- Conexiones de la Fuente de Corriente Agilent 6675A con el Circuito Inversor de Campo, y la conexión de este Circuito Inversor con el Electroimán.
- La conexión del Gaussímetro LakeShore 455 DSP con la Sonda Hall, la cual debe estar ubicada en el centro del Electroimán para la medición de campo.

Finalmente se encienden los siguientes equipos: Computador, Fuente de Corriente 6221 DC y AC, Nanovoltmetro 2182A, Gaussímetro LakeShore 455 DSP, Fuente de Corriente Agilent 6675A, y el Conmutador para el caso en que se vayan hacer medidas con la técnica de Van Der Pauw.

A.2 Software del sistema

El software diseñado, en el entorno de LabView, requiere (como mínimo) de un Computador con un procesador Pentium III o Celeron de 600 MHz, se recomiendan 130 MB de espacio en disco para la instalación mínima y de 550 MB para la instalación completa, de un mínimo de 64 MB de memoria RAM, y de una resolución de pantalla de 800 x 600 pixeles.

Antes de hablar del manejo de los programas del sistema Hall, cabe anotar que el PC debe tener instalado LabView versión 7.0 (o superior), también se deben instalar los Drivers de los equipos constituyentes del sistema, y contar con los programas diseñados en este trabajo para el sistema de efecto Hall, dichos drivers y programas serán proporcionados en un CD para una eventual instalación.

Inicialmente, contando con lo anterior, abra el acceso directo con el nombre de *Sistema de Medidas de Efecto Hall DC y AC* que se encuentra en el escritorio, aquí va encontrar siete programas correspondientes a: Sistema de Medidas de Resistividad, Sistema Hall basado en Cuatro Puntas (variando corriente y campo), Sistema Hall basado en Van Der Pauw (variando corriente y campo), y Sistema Hall AC (variando campo y frecuencia). A continuación se dará una explicación detallada del manejo de cada uno de estos programas.

A.2.1 Sistema de Medidas de Efecto Hall basado en Cuatro Puntas

Este sistema consta de dos programas, uno para realizar medidas variando corriente y otro para hacer medidas variando campo magnético. En las figuras A.1 y A.2 se presentan las ventanas correspondientes a estos sistemas Hall variando corriente y variando campo respectivamente, las cuales aparecen una vez ejecutados los programas.

En la ventana del sistema para variación de corriente (figura A.1) se pide inicialmente el espesor de la muestra (50 μm por defecto) para el cálculo de densidad. Luego se piden los campos magnéticos constantes (varios campos) con los que el usuario quiere trabajar, teniendo en cuenta de que el campo máximo es de 800 mT y que el paso mínimo de campo es de 10 mT; aquí también está la opción de colocar un tiempo de relajación para que la muestra se estabilice con el campo aplicado (máximo de 30 segundos), y de colocar un tiempo de espera entre cada campo constante para que el sistema descansa (máximo de 60 minutos). Después esta la parte de elección del rango de corriente con el

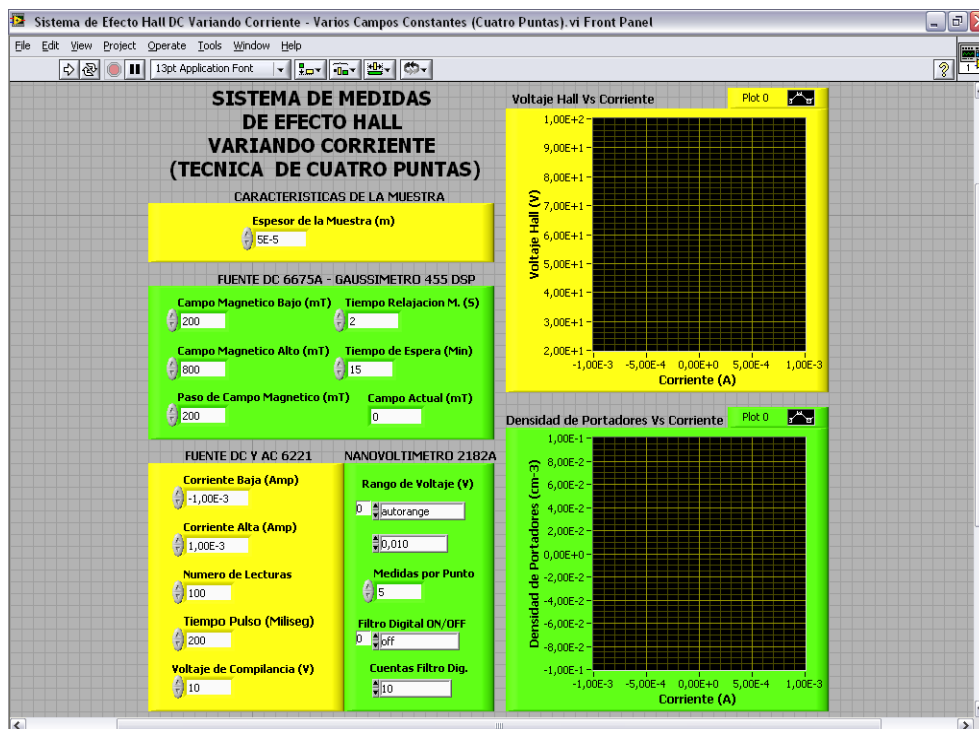


Figura A.1. Ventana del Sistema Hall variando corriente (Cuatro Puntas).

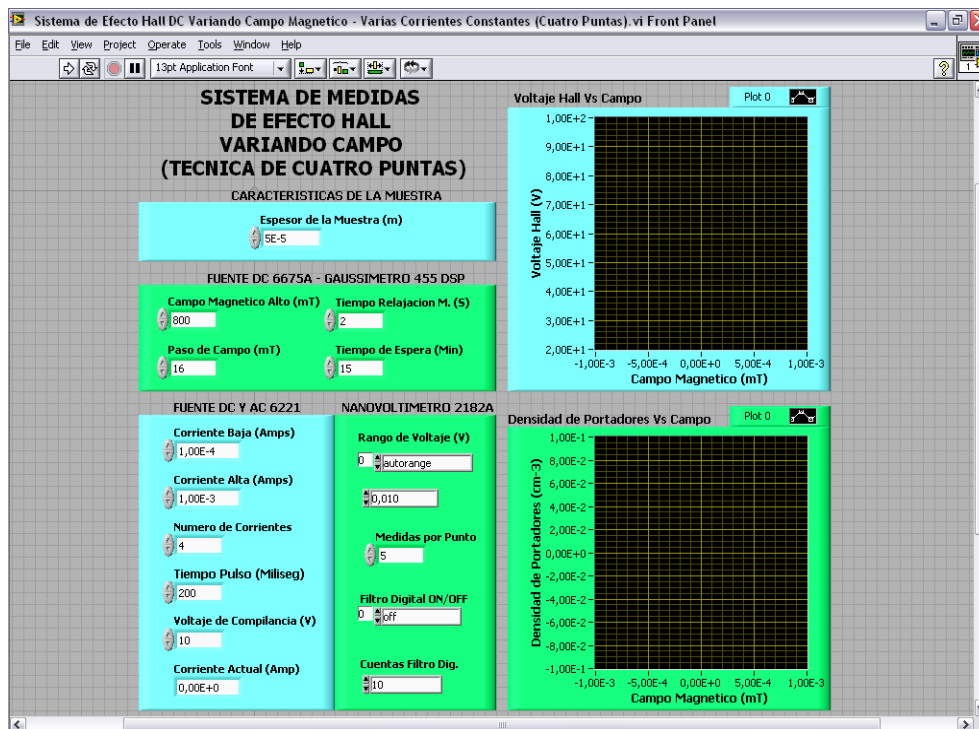


Figura A.2. Ventana del Sistema Hall variando campo (Cuatro Puntas).

que se quiere trabajar, el rango por defecto es de -1 a 1 mA , y aunque la corriente máxima aceptada es de 0.1 A, el usuario debe tener en cuenta que hay muestras que se pueden dañar si la corriente aplicada supera un cierto valor; otra de las opciones es el número de lecturas que el sistema efectúa en ese rango de corriente (100 lecturas por defecto), el tiempo de duración del pulso de corriente aplicado a la muestra (Delta Mode) con un mínimo de 150 ms, y el voltaje de compilancia necesario para sostener esa corriente (ley de Ohm). Finalmente están las variables relacionadas con la medición de voltaje sobre el material estudiado, entre ellas están el rango de voltaje (autorange por defecto), y aunque su mínimo es de 0.01 V, la resolución llega hasta los nanovoltios; también está el número de medidas por punto (máximo de 10), de las cuales el sistema saca un promedio; y la opción de trabajar con filtros. Después de la elección de los parámetros de trabajo se pone a correr el sistema (flecha superior izquierda de la ventana) y aparecerá la opción de donde se quieren guardar los datos medidos, aquí se deben escribir los datos principales de medida (nombre de muestra, rango de corriente, campos constantes, entre otros). Los resultados de las medidas de voltaje Hall y de densidad de portadores serán constantemente visualizados en pantalla y finalmente guardados en la ruta elegida.

En el sistema de variación de campo magnético (figura A.2) las variables involucradas en el proceso, a diferencia de la anterior, son el campo alto o máximo de rango de trabajo (para un campo alto de 800 mT corresponde el rango de -800 a 800 mT), con un paso mínimo de 1 mT; el tiempo de relajación de la muestra (máximo de 30 s), y el número de corrientes constantes con las que se desea trabajar entre una corriente baja y una corriente alta (4 corrientes entre 0.1 y 1 mA por defecto).

A.2.2 Sistema de Medidas de Efecto Hall basado en Van Der Pauw

También fueron diseñados varios programas basados en la técnica de Van Der Pauw, uno para hacer medidas de resistividad (ver figura A.3), y dos para realizar medidas de

efecto Hall variando corriente y variando campo. Las ventanas de estos dos últimos programas son mostradas en las figuras A.4 y A.5 respectivamente.

En la ventana del sistema de medidas de resistividad (figura A.3) se solicita al usuario ingresar el valor del espesor de la muestra ($50\text{ }\mu\text{m}$ por defecto), la corriente que se quiere aplicar a la muestra (hasta 0.1 A), el voltaje de compilancia (voltaje para sostener la corriente), el tiempo del pulso de corriente, el rango de voltaje que va a medir el nanovoltímetro (autorange por defecto), el número de medidas de voltaje por punto (las cuales se promedian), y la opción del uso de filtros. Luego de selección de estos parámetros, se coloca el programa a correr (flecha superior izquierda de la ventana) y se espera hasta que termine, lo cual no demora mucho (unos pocos segundos). Entre los resultados arrojados por el sistema están los voltajes y las resistencias típicas de la técnica, los porcentajes de error (consistencia de medidas y teorema de reciprocidad), las

Figura A.3. Ventana del Sistema de Medidas de Resistividad (Van Der Pauw).

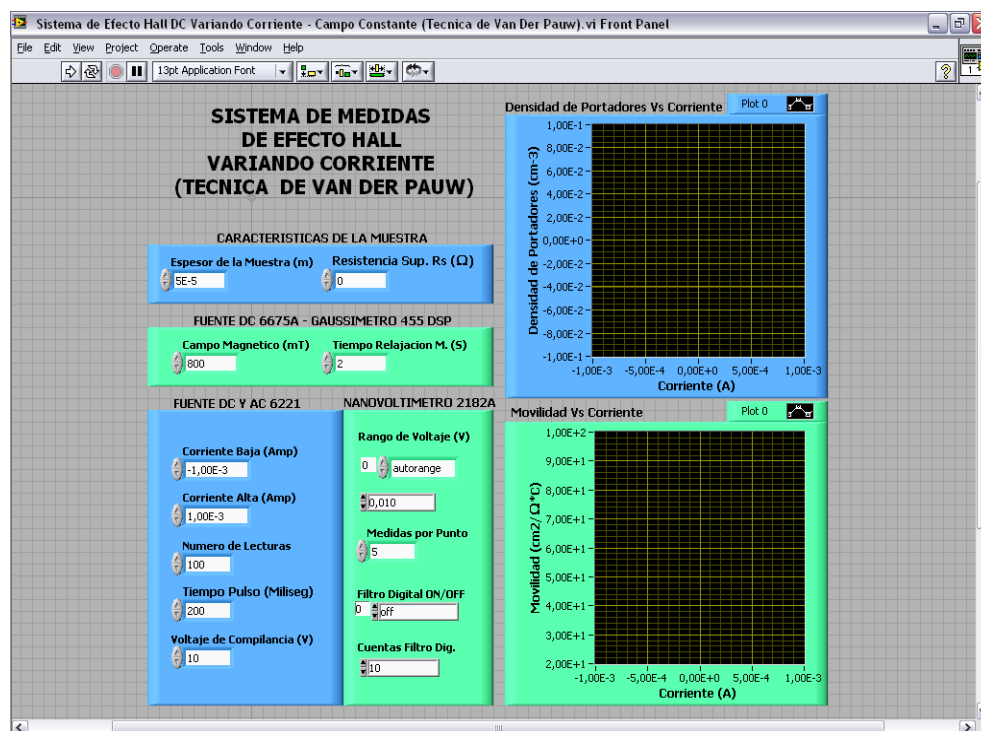


Figura A.4. Ventana del Sistema Hall variando corriente (Van Der Pauw).

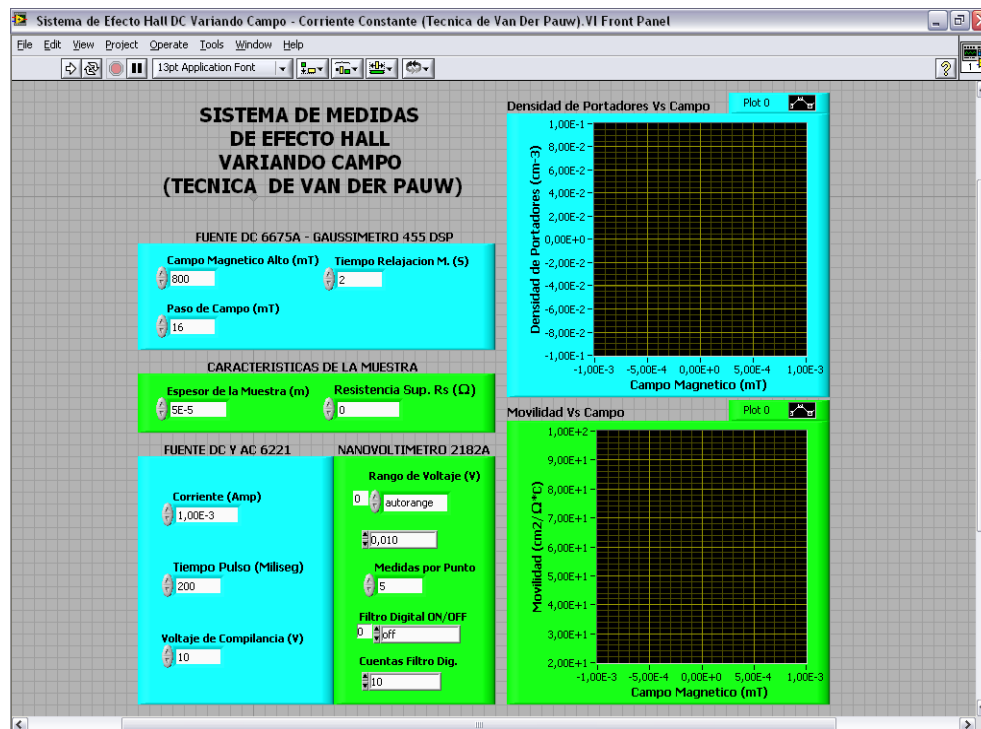


Figura A.5. Ventana del Sistema Hall variando campo (Van Der Pauw).

resistencias características R_A y R_B , la resistencia superficial R_S , y la resistividad ρ (en ohmios por centímetro) de la muestra analizada. Dependiendo de los porcentajes de error obtenidos (no mayores a 10%) el usuario anotara los resultados que requiera.

Las ventanas correspondientes al sistema de medidas de efecto Hall basado en Van Der Pauw (figuras A.4 y A.5) son muy similares a las ventanas del sistema basado en Cuatro puntas, la diferencia radica en que las primeras requieren de la resistencia superficial (R_S) de la muestra (obtenida con el sistema de resistividad), y de un solo valor de campo magnético constante (sistema de variación de corriente) y un solo valor de corriente constante (sistema de variación de campo). La ventaja del sistema de Van Der Pauw (sobre el de Cuatro Puntas) es que arroja resultados directos de densidad y movilidad de portadores, y elimina voltajes no deseados como los debidos a efectos termomagnéticos.

A.2.3 Sistema de Medidas de Efecto Hall basado en la Técnica AC

El software correspondiente a la técnica AC consta de dos programas principales, uno para llevar a cabo medidas variando el campo magnético (ver figura A.6), y otro para hacer medidas en función de la frecuencia (ver figura A.7).

En la ventana correspondiente al sistema Hall AC variando campo (figura A.6) se pide al operador (o usuario), el espesor de la muestra, el valor de campo magnético alto correspondiente al rango de campo de trabajo (-800 a 800 mT por defecto), el paso de campo (separación entre medidas), el tiempo de relajación de la muestra, el tiempo de espera del sistema entre cada frecuencia, el número de frecuencias constantes (varias frecuencias) que se van a hacer entre una frecuencia baja y una frecuencia alta (mínimo de 1 mHz y máximo de 1000 mHz), la amplitud de la corriente alterna (senoidal) aplicada a la muestra (hasta 0.1 A), el offset de esa corriente (0 A por defecto), el rango de voltaje 1 (voltaje Hall) y el rango de voltaje 2 (voltaje de corriente aplicada) medido por el nanovoltímetro, y finalmente esta la opción de filtros (sin filtro por defecto).

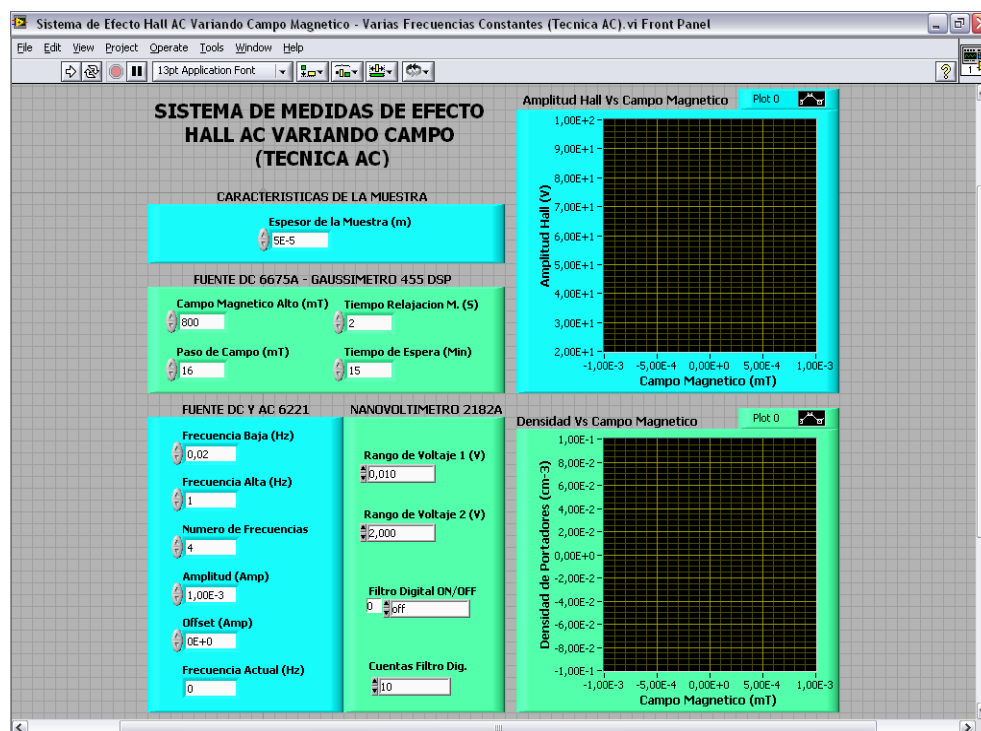


Figura A.6. Ventana del Sistema Hall variando campo (Técnica AC).

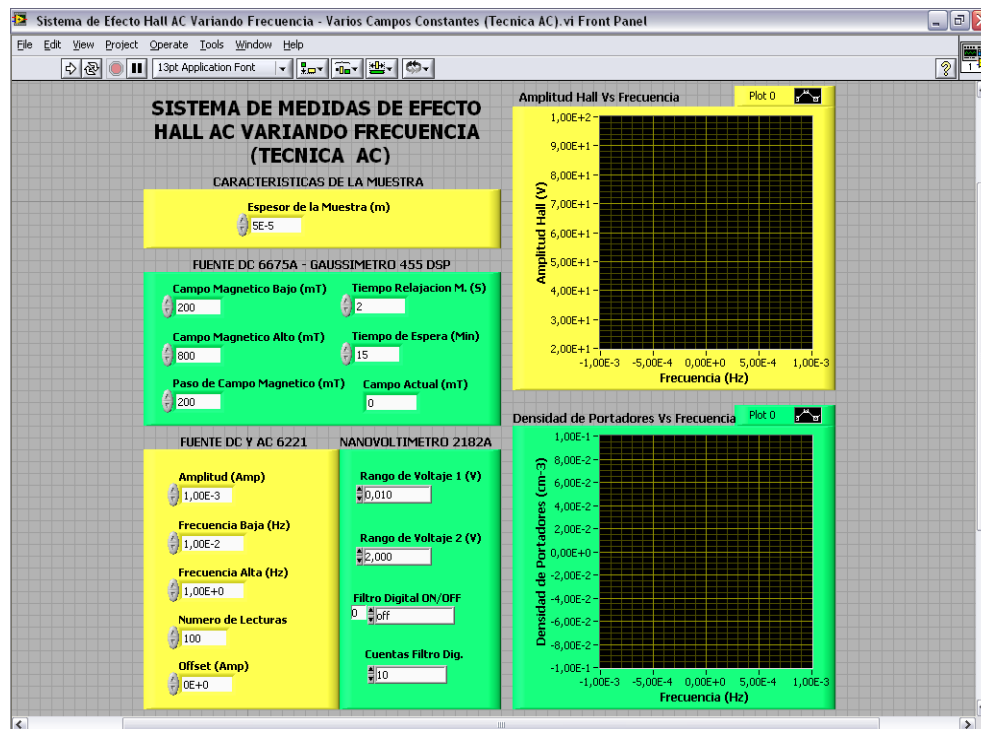


Figura A.7. Ventana del Sistema Hall variando frecuencia (Técnica AC).

Luego de terminar el ingreso de estos valores se pone a correr el programa y se guardan los datos en la ruta y con el nombre que se desee.

El sistema Hall AC variando frecuencia (figura A.7) se diferencia del anterior en que este solicita los campos magnéticos constantes con los que se quiere trabajar, con un mínimo de paso de campo de 10 mT, el tiempo de espera del sistema entre cada campo, y el número de lecturas a realizar en un rango de frecuencias entre una frecuencia baja y una frecuencia alta (hasta 1 Hz).

Los sistemas Hall AC anteriores (variando campo y frecuencia) dan como resultado la amplitud Hall, la densidad de portadores y la fase de la muestra, pero para obtener la fase Hall es necesario hacer un Background, esto se hace restando a las medidas obtenidas a un campo (diferente de cero) las medidas obtenidas para un campo de 0 mT (con los programas para hacer Background suministrados), a partir de estos resultados se puede obtener los gráficos de fase Hall en función del campo y de la frecuencia.

B. Anexo: Artículos y trabajos relacionados con este trabajo

En el desarrollo de este trabajo se participó en el XXIII Congreso Nacional de Física realizado en la ciudad Santa Marta con dos trabajos, uno en la modalidad de poster y el otro en forma oral. Como resultado de esto se publicó un artículo en la Revista Colombiana de Física titulado “*Comportamiento Magnético y Propiedades de Magneto-transporte de Cintas Magnéticas Blandas Basadas en Cobalto*” el cual se presenta en las siguientes páginas. El otro trabajo titulado “*Estudio de las Propiedades Eléctricas de las Cintas $Co_{71}Fe_4B_{15}Si_{10}$ y $Co_{64}Fe_{21}B_{15}$* ” se encuentra en revisión por la misma revista.



Revista Colombiana de Física, Vol. 42, No. 3 de 2010.



Comportamiento Magnético Y Propiedades De Magneto-Transporte De Cintas Magnéticas Blandas Basadas En Cobalto

Magnetic Behavior And Magneto-Transport Properties Of Cobalt-Based Soft Magnetic Ribbons

A. Rosales-Rivera *^a, J. Jaither Melo^a, A. Velásquez^a

^a *Laboratorio de Magnetismo y Materiales Avanzados. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.*

Recibido 23.03.10; Aceptado 16.11.10; Publicado en línea 17.04.11.

Resumen

Los materiales magnéticos en forma de cintas basados en CoFeBSi han atraído considerablemente la atención desde 1980 debido a sus aplicaciones en dispositivos electrónicos. El interés por estos materiales también se ha fortalecido recientemente debido al fenómeno de magnetoimpedancia gigante, MIG, observado en ellos a principios de 1990. Este fenómeno consiste en un enorme cambio de la impedancia compleja, Z , de aleaciones ferromagnéticas blandas expuestas a un campo magnético estático, H . Se han estudiado diferentes aspectos de este fenómeno, como la dependencia del fenómeno MIG con la frecuencia y con el campo magnético aplicado, y la relación entre el fenómeno MIG y el comportamiento de la magnetización dc de los materiales que lo exhiben. Sin embargo, muy poca atención se ha dado a otras propiedades de los materiales que exhiben el fenómeno MIG, tales como la susceptibilidad ac y el efecto Hall. En este trabajo se presentan nuevos resultados de magnetoimpedancia, efecto Hall, magnetización dc y susceptibilidad ac, de materiales magnéticos blandos en forma de cintas del tipo CoFeBSi.

Palabras clave: Magnetoimpedancia; Efecto Hall.

Abstract

The magnetic materials in ribbon form based in CoFeBSi have brought considerably attention since 1980 due to its applications in electronic devices. The interest in these materials has also been strengthened recently due to the giant magnetoimpedance effect, GMI, observed in the beginning of 90's. This phenomenon consists in an enormous change in the complex impedance, Z , in soft ferromagnetic alloys exposed to a static magnetic field, H . Different aspects of this phenomenon have been studied, such as the GMI dependence on both the frequency as well as the applied magnetic field. Besides, the relationship between the GMI and the dc magnetization has been established. However, very little attention has been given to other properties of the materials that exhibit the GMI, such as the ac susceptibility and the Hall Effect. In this paper, we present new magnetoimpedance, Hall Effect, dc magnetization and ac susceptibility results of soft magnetic materials like ribbons of CoFeBSi.

Keywords: Magnetoimpedance; Hall effect.

PACS: 73.50.Jt; 75.60.Ej.

© 2010 Revista Colombiana de Física. Todos los derechos reservados

1. Introducción

En este trabajo se presenta un estudio de las propiedades magnéticas y eléctricas de cintas basadas en CoFeBSi mediante las técnicas de magnetoimpedancia, efecto Hall, magnetización dc y de susceptibilidad ac. A continuación se dará una breve descripción de todos estos fenómenos. El efecto de magnetoimpedancia gigante (MIG) consiste en la fuerte dependencia de la impedancia eléctrica de un conductor ferromagnético con un campo magnético axial aplicado cuando una corriente eléctrica ac está fluyendo a lo largo de la muestra. El efecto MIG se encuentra asociado al efecto clásico de “skin” en un conductor magnético, el cual consiste en un cambio en la profundidad de penetración del campo magnético dc aplicado sobre el material para una corriente ac dada [1].

El efecto Hall predice el comportamiento de un material conductor cuando se encuentra en presencia de un campo magnético perpendicular a la dirección del flujo de la corriente eléctrica aplicada a dicho material, de tal manera que se genera en su interior un campo eléctrico a consecuencia de la desviación de las trayectorias de las partículas cargadas que produce la fuerza del campo magnético. Cuando la carga eléctrica acumulada en los bordes del conductor llega a un cierto valor, el campo eléctrico inducido, llamado voltaje de Hall, cancela el efecto del campo magnético y el flujo cesa. En los materiales ferromagnéticos el efecto Hall presenta dos tipos de contribuciones independientes, una debida al efecto Hall ordinario y la otra debida a la magnetización de la muestra [2,3].

La técnica de magnetometría de muestra vibrante [4] es una medida de la magnetización de un material en función del campo magnético y temperatura y usa el hecho de que cuando un material magnético se expone a un campo magnético uniforme, se magnetiza alineando sus dominios magnéticos o sus espines magnéticos individuales con el campo, creándose un momento dipolar magnético proporcional al producto de la susceptibilidad del material por el campo magnético aplicado. Si la muestra se somete a movimiento senoidal, el cambio en el flujo magnético en las cercanías de la muestra inducirá una señal eléctrica en unas bobinas estacionarias. La señal inducida en las bobinas es proporcional a la magnetización de la muestra y por consiguiente brinda información sobre el comportamiento magnético de dicho material, esto permite la determinación de lazos de histéresis. Recientes trabajos de magnetización en materiales en forma de cintas utilizando esta técnica se han reportado por A. Rosales-Rivera et al [5].

La susceptibilidad magnética ac es una medida de la magnetización de la muestra y se define como la derivada de la magnetización con respecto al campo magnético ac aplicado [6]. En la medida de susceptibilidad magnética ac se usa el concepto de

inductancia mutua, en donde dos bobinas idénticas se sitúan simétricamente dentro de una bobina primaria (secundario del circuito de medida). Las dos bobinas se conectan en oposición para cancelar los voltajes inducidos por el campo ac o voltajes inducidos por fuentes externas (ruidos) y la muestra se ubica en una de esas bobinas; el voltaje inducido en las bobinas por la muestra magnética es proporcional a la derivada temporal de la magnetización de la muestra. La susceptibilidad magnética ac consta de dos medidas, una componente en fase (parte real X') y una fuera de fase (parte imaginaria X'') [7,8].

Aquellos materiales que muestren un adecuado comportamiento magnético se utilizan en la fabricación de sensores, sistemas de almacenamiento de información y en el desarrollo de nuevas tecnologías [9].

2. Detalles Experimentales

2.1. Medidas de Magnetoimpedancia Gigante (MIG)

Se realizaron medidas de magnetoimpedancia en cintas con composición $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{10}\text{B}_{10}\text{Si}_{10}$ y $\text{Co}_{72}\text{Fe}_8\text{B}_{10}\text{Si}_{10}$, con dimensiones de 2 mm de ancho y 30 μm de espesor. Se estudió la respuesta de magnetoimpedancia para cintas con una longitud de 1.3 cm, para corrientes ac con frecuencias entre 0.5 y 9 MHz y amplitud constante de 1 mA (valor rms), en un rango de campo magnético entre -74 y 74 Oe, usando la técnica de cuatro puntas. Se aplicó el campo magnético dc paralelo a la dirección de la corriente ac a lo largo de la dirección longitudinal de las cintas. Los datos se colectaron para pasos consecutivos de campo de aproximadamente 1 Oe. Todas estas medidas fueron realizadas a temperatura ambiente.

2.2 Medidas de Magnetización dc

Se realizaron medidas de magnetización en función de campo magnético, para campos entre -10.000 y 10.000 Oe, a temperatura ambiente para las aleaciones amorfas magnéticamente blandas en forma de cintas de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$ y $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ con longitudes de 4 mm empleando la técnica de magnetometría de muestra vibrante (MMV). Los datos se tomaron aplicando un campo magnético de hasta 10.000 Oe, dividido en dos rangos: de 0 a +/- 300 y de +/- 300 hasta +/- 10.000 Oe con un incremento de 20 Oe/s.

2.3 Medidas de Susceptibilidad ac

Las medidas de susceptibilidad ac se hicieron sobre cintas de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$ y $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ a temperatura ambiente. Las medidas se realizaron entre -74 y 74 Oe manteniendo fija la frecuencia, repitiéndose este proceso para diferentes frecuencias, de 10 a 100 Hz con incrementos de 10 Hz, de 100 Hz a 1 KHz con incrementos de 100 Hz y de 1 a 10 KHz con incrementos de 1 KHz.

2.4 Medidas de Efecto Hall dc

Las medidas de efecto Hall se realizaron sobre cintas magnéticas de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$ y $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ variando la corriente entre -10 y 10 mA, estas medidas se hacen en presencia de un campo magnético constante, con campos que van desde 200 a 1.200 Oe con incrementos de 200 Oe. A partir de los anteriores datos se construyeron las gráficas de voltaje Hall contra corriente, a campo constante. Utilizando estos valores de voltaje se determinó la densidad de portadores de carga en las cintas.

3. Resultados Experimentales

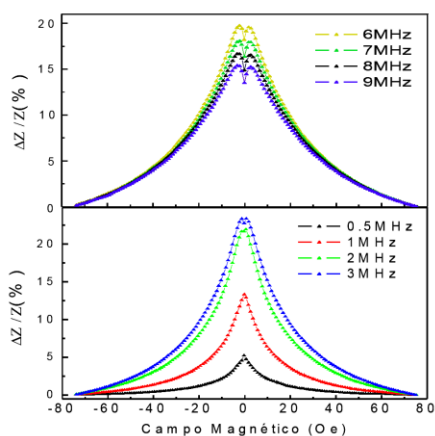


Fig. 1: Medidas de magnetoimpedancia de la cinta $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{10}\text{B}_{10}\text{Si}_{10}$.

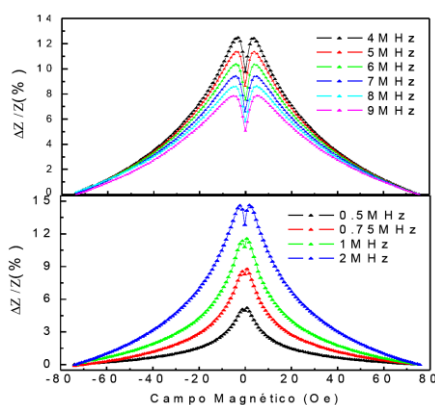


Fig. 2: Medidas de magnetoimpedancia de la cinta $\text{Co}_{72}\text{Fe}_8\text{B}_{10}\text{Si}_{10}$.

En las figuras 1 y 2 presentamos la dependencia con el campo de la impedancia total (Z) para las aleaciones de $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{10}\text{B}_{10}\text{Si}_{10}$ y $\text{Co}_{72}\text{Fe}_8\text{B}_{10}\text{Si}_{10}$ respectivamente para frecuencias entre 0,5 y 9 MHz. Las respuestas de la Magnetoimpedancia de estas aleaciones presentan un

solo pico cuando el campo tiende a cero para frecuencias hasta de 1 MHz para la cinta de $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{10}\text{B}_{10}\text{Si}_{10}$, mientras que para frecuencias superiores a 1 MHz, se presentan dos picos. Para la cinta de $\text{Co}_{72}\text{Fe}_8\text{B}_{10}\text{Si}_{10}$ los resultados de MIG presentan de nuevo un comportamiento de dos picos, pero en este caso, se empieza a presentar débilmente desde frecuencias de 0,5 MHz y se define completamente para una frecuencia de 2 MHz.

En la figura 3 presentamos la curva de magnetización vs campo aplicado para aleaciones de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$ y $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$, en la cual no se aprecia histéresis, rasgo característico de materiales magnéticamente blandos. Se encuentra que la magnetización de saturación para la cinta $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$ es 93,8985 emu/g y para la cinta y $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ es 121,2229 emu/g.

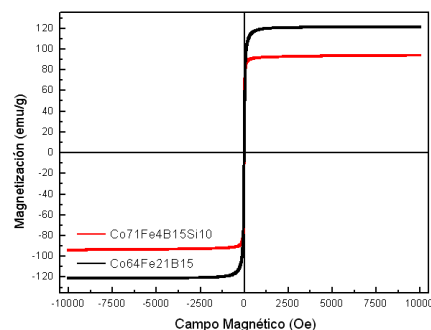


Fig. 3: Gráfica de magnetización vs campo para las cintas $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$ y $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$

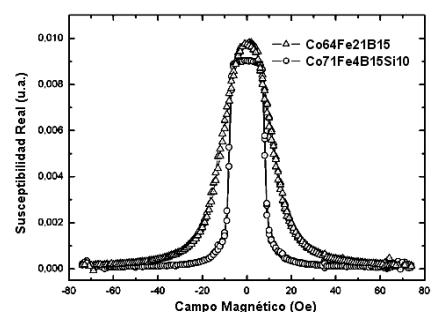


Fig. 4: Gráfica de susceptibilidad real vs campo para las cintas de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ y $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$ para una frecuencia de 400 Hz.

En la figura 4 observamos que las cintas de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ presentan picos definidos de susceptibilidad real X' en comparación con los comportamientos en forma de meseta de las cintas de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$. La meseta puede estar asociada a un endurecimiento magnético de la muestra. Es decir, la muestra $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ presenta un

comportamiento magnético más blando que la muestra de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$.

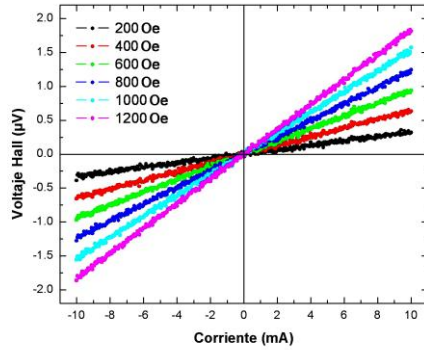


Fig. 5: Gráfica de voltaje Hall vs corriente para varios campos constantes de la cinta $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$.

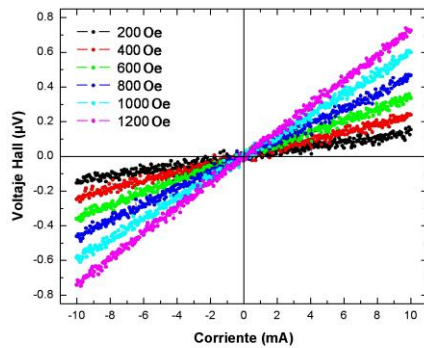


Fig. 6: Gráfica de voltaje Hall vs corriente para varios campos constantes de la cinta $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$.

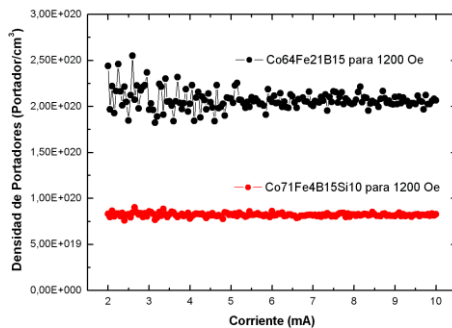


Fig. 7: Gráfica de densidad de portadores vs corriente para un campo constante de 1200 Oe de las cintas $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$ y $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$.

En las figuras 5 y 6 presentamos las gráficas de voltaje Hall vs corriente para $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$ y $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$. Estas gráficas muestran la relación lineal del voltaje Hall con la corriente aplicada, con voltajes medidos del orden de los microvoltios. En la gráfica de voltaje contra corriente se observa un aumento de la pendiente de la recta con el campo aplicado.

A partir de estos resultados de efecto Hall determinamos la densidad de portadores. El promedio de la densidad de portadores es de 2.05×10^{20} portador/ cm^3 para la cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$, y de 8.25×10^{19} portador/ cm^3 para la cinta de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$ (ver fig. 7).

4. Conclusiones

Los resultados de magnetoimpedancia muestran un comportamiento de uno y dos picos para la cinta de $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{10}\text{B}_{10}\text{Si}_{10}$, mientras que para la cinta de $\text{Co}_{72}\text{Fe}_8\text{B}_{10}\text{Si}_{10}$ el comportamiento siempre es de dos picos para las frecuencias trabajadas. Además, el máximo de magnetoimpedancia decrece al aumentar el contenido de cobalto, esto favorece a las cintas de $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{10}\text{B}_{10}\text{Si}_{10}$ sobre las cintas de $\text{Co}_{72}\text{Fe}_8\text{B}_{10}\text{Si}_{10}$.

De las medidas de susceptibilidad y magnetización se concluye que las cintas de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ son magnéticamente más blandas que las de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$, ya que la cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ presenta una mayor magnetización de saturación y un pico de susceptibilidad mayor y más angosto.

El efecto Hall muestra que la cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ tiene un menor voltaje Hall y una mayor densidad de portadores que la cinta de $\text{Co}_{71}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{10}$, siendo la cinta de $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{21}\text{B}_{15}$ mejor conductora eléctrica.

Finalmente se puede concluir que las cintas estudiadas con menor contenido de cobalto, mayor cantidad de hierro, y sin contenido de silicio, tienen mejores propiedades magnéticas y eléctricas.

5. Agradecimientos

Agradecemos a la dirección de investigaciones de Manizales DIMA de la universidad Nacional de Colombia por su aporte financiero para la realización de este trabajo.

Referencias

- [1] Knobel, M. and Pirota, K.R. J. Magn. Magn. Mater. 242-245, Campinas, 2002, p. 33-40.
- [2] Ashcroft, Neil W. and Mermin, N. David. Solid State Physics, New York, Holt-Saunders Int. Editions, 1976, p. 15.

- [3] Goncalves, L.A.P. and Soares, J.M. and Machado, F.L.A. and Azevedo, W.M. J. Magn. Magn. Mater. B 384, Recife, 2006, p. 152-154.
- [4] Foner, S., Rev. Sci. Instrum 27, 548 (1956).
- [5] Rosales-Rivera, A., Restrepo, J.A., Sanin, M.A., y Patiño, O.E. Revista Colombiana de Física: Desarrollo de un magnetómetro de muestra vibrante. 38, Manizales, 2006, p. 77-80.
- [6] Velásquez, Abilo A. Diseño y desarrollo de la técnica de susceptibilidad magnética ac: aplicación al estudio de cintas magnéticamente blandas. Manizales, 2009, 60 h. Tesis de grado (Magister en Física). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Física y Química.
- [7] Martien, Dinesh. Introduction to AC Susceptibility, publicación en línea, http://www.lotoriel.com/site/site_down/qd_acsusceptibility_deen02.pdf, citado el 1 de octubre de 2009.
- [8] University of Florida. AC Susceptibility Measurements in High-Tc Superconductors, publicación en línea, http://www.phys.ufl.edu/courses/phy4803L/group_II/high_Tc/high_tc.pdf, citado el 2 de octubre de 2009.
- [9] Neagu, M. and Chiriac, H. and Lozovan, M. Sensors Actuat. A 106, Iasi, 2003, p. 73.